A Alma de Leonardo da Vinci

Um gênio em busca do segredo da vida

Fritjof Capra

Autor do *best-seller O TAO DA FÍSICA*

Cultrix / Amana-Key

FRITJOF CAPRA

A *Alma* de LEONARDO DA VINCI

Um Gênio em Busca do Segredo da Vida

Tradução:
GILSON CÉSAR CARDOSO DE SOUSA

Editora Cultrix
SÃO PAULO

Título original: *Leonardo´s Soul – A Genius in Search of the Secret of Life.*

Copyright ©2012 Fritjof Capra.

Copyright da edição brasileira © 2012 Editora Pensamento-Cultrix Ltda.

Texto de acordo com as novas regras ortográficas da língua portuguesa.

1ª edição 2012.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou usada de qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, inclusive fotocópias, gravações ou sistema de armazenamento em banco de dados, sem permissão por escrito, exceto nos casos de trechos curtos citados em resenhas críticas ou artigos de revistas.

A Editora Cultrix não se responsabiliza por eventuais mudanças ocorridas nos endereços convencionais ou eletrônicos citados neste livro.

Coordenação editorial: Denise de C. Rocha Delela e Roseli de S. Ferraz **Preparação de originais:** Roseli de S. Ferraz **Revisão:** Yociko Oikawa

Diagramação: Join Bureau **Design da capa:** Juliette Capra **Crédito da capa:** Retrato de Mona Lisa. Leonardo da Vinci (1452-1519). Crédito da fotografia © RMN (Museu do Louvre)/Michel Urtado.

Nota: Para as citações tratadas pelos manuscritos de Leonardo fez-se referência às edições acadêmicas relacionadas na Bibliografia. Boa parte dessas edições está disponível on-line no site e-Leo (www.leonardodigitale.com), organizado pela Biblioteca Leonardiana de Vinci.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Capra, Fritjof

A alma de Leonardo da Vinci : um gênio em busca do segredo da vida / Fritjof Capra ; tradução Gilson César Cardoso de Sousa. – São Paulo : Cultrix, 2012.

Título original: Leonardo’s Soul : a genius in search of the secret of life Bibliografia

ISBN 978-85-316-1199-5

1. Ciência renascentista 2. Cientistas – Itália – História – Até 1500 – Biografia 3. Cientistas – Itália – História – Século 16 – Biografia 4. Leonardo, da Vinci, 1452-1519 5. Leonardo, da Vinci, 1452-1519 – Cadernos de notas, desenhos, etc. I. Título.

12-11505 CDD-509.2

Índices para catálogo sistemático:
1. Itália : Cientistas : Biografia e obra 509.2

Direitos de tradução para a língua portuguesa
adquiridos com exclusividade pela
EDITORA PENSAMENTO-CULTRIX LTDA.
Rua Dr. Mário Vicente, 368 — 04270-000 — São Paulo, SP
Fone: (11) 2066-9000 — Fax: (11) 2066-9008
E-mail: atendimento@editoracultrix.com.br
http://www.editoracultrix.com.br
que se reserva a propriedade literária desta tradução.
Foi feito o depósito legal.

SUMÁRIO

Agradecimentos

Prefácio

Introdução: A Ciência das Formas Vivas de Leonardo

PARTE I FORMA E TRANSFORMAÇÃO NO MACROCOSMO

CAPÍTULO 1. Os Movimentos da Água

CAPÍTULO 2. A Terra Viva

CAPÍTULO 3. O Crescimento das Plantas

PARTE II FORMA E TRANSFORMAÇÃO NO CORPO HUMANO

CAPÍTULO 4. A Figura Humana

CAPÍTULO 5. Os Elementos da Mecânica

CAPÍTULO 6. O Corpo em Movimento

CAPÍTULO 7. A Ciência do Voo

CAPÍTULO 8. O Mistério da Vida

Apêndice A: Cronologia da Vida e das Obras de Leonardo

Apêndice B: Cronologia das Descobertas Científicas

Apêndice C: Gravuras

Notas

Os Cadernos de Notas de Leonardo:
Fac-símiles e Transcrições

Bibliografia

Créditos das fotos

Agradecimentos (fotografias)

AGRADECIMENTOS

Quando decidi empreender uma análise aprofundada dos trabalhos científicos de Leonardo da Vinci e avaliá-los do ponto de vista de nossa ciência contemporânea, descobri, perplexo, que em muitas áreas sua pesquisa era tão minuciosa e técnica que eu não poderia fazer isso sem a ajuda de colegas cientistas especializados em outras disciplinas.

Sou grato principalmente a Ugo Piomelli por sua correspondência esclarecedora sobre a dinâmica dos fluidos, por passar horas ajudando-me a analisar os desenhos e as descrições de fluxos turbulentos de água e ar, de Leonardo, e fazer uma leitura crítica do Capítulo 1: “Os Movimentos da Água”.

A Mattia Sella pelas cartas que elucidaram alguns termos téc nicos da moderna geologia e seus comentários criteriosos, bastante detalhados, sobre o Capítulo 2: “A Terra Viva”; e a Ann Pizzorusso pela correspondência repleta de informações sobre a história da geologia.

A Alessandro Menghini pela leitura crítica do capítulo sobre a botânica de Leonardo e por me ajudar com a nomenclatura botânica em latim e italiano; e a Zora Hanackova pela útil correspondência sobre fisiologia das plantas.

A Domenico Laurenza por seu constante encorajamento, por inspirar discussões e troca de correspondência a respeito de vários aspectos da anatomia de Leonardo, bem como por sua leitura crítica do Capí - tulo 5: “Os Elementos da Mecânica”.

A Michael Nauenberg por suas esclarecedoras discussões sobre a história da mecânica nos séculos XVI e XVII, tanto quanto por seus comentários ao capítulo sobre a mecânica de Leonardo.

A Helmut Milz por me explicar diversas sutilezas da anatomia humana e seus oportunos comentários sobre as seções do livro que tratam dos estudos anatômicos de Leonardo.

E a Siggy Zerweckh por inspirar discussões sobre a histó ria da aerodinâmica e sua leitura crítica do Capítulo 7: “A Ciência do Voo”.

Sou também muito grato a Carlo Pedretti por seu inabalável encorajamento e apoio; e a Linda Warren, ex-bibliotecária-chefe da Elmer Belt Library, por me permitir acesso irrestrito às suas coleções de edições em fac-símile dos manuscritos de Leonardo, bem como pela ajuda generosa em pesquisa bibliográfica.

Meus agradecimentos a Françoise Viatte pelo apoio e as proveitosas discussões sobre *A Virgem do Rochedo* e os

manuscritos de Leonardo que estão na Bibliothèque de l’Institut de France.

Agradeço a Satish Kumar e Inga Page por me darem a oportunidade de ministrar um curso sobre a síntese de Leonardo de arte e ciência no Schumacher College, Inglaterra, durante a primavera de 2010, a Peter Adams, com quem dividi as aulas, e aos participantes do curso pelas muitas perguntas inteligentes e sugestões proveitosas.

Sou profundamente grato a meu irmão, Bernt Capra, que leu todo o manuscrito, por seu apoio entusiástico e numerosas sugestões úteis. Sou igualmente grato a Ernest Callenbach e à minha filha, Juliette Capra, por lerem partes do manuscrito e oferecerem comentários críticos dos mais oportunos; e a Borys Czernichowski pela execução primorosa e a entrega rápida dos desenhos técnicos deste livro.

Agradeço especialmente à minha assistente, Trena Cleland, que organizou com cuidado e sensibilidade o primeiro esboço do manuscrito, controlando habilmente o fluxo de comunicações para meu escritório enquanto eu me ocupava com a escrita do livro.

Sou grato a Carlo Alberto Brioschi, Michela Gallio e Sara Galinetto, de Rizzoli, por seu apoio entusiástico; e a Jordi Pigem e Sara Galinetto por sua ajuda nos contatos com diversos museus e bibliotecas a fim de obtermos reproduções das obras de Leonardo e as autorizações para usá-las como ilustrações neste livro.

Por fim, quero expressar gratidão não menor à minha esposa, Elizabeth Hawk, pelas muitas discussões sobre arte

e cultura renascentistas, por sugerir e ajudar-me a elaborar a lista de descobertas científicas do Apêndice B, e por seu paciente e contínuo apoio durante os anos de pesquisa e redação.

PREFÁCIO

Em seu clássico *Vidas dos Artistas*, o pintor e arquiteto italiano Giorgio Vasari disse a respeito de Leonardo da Vinci:

> Seu nome se tornou tão famoso que não foi estimado apenas em vida, mas sua reputação perdurou e tornou-se ainda maior depois de sua morte.

Com efeito, durante o Renascimento, Leonardo era célebre como artista, engenheiro e inventor em toda a Itália, França e outros países europeus. Nos séculos posteriores à sua morte, essa fama se espalhou pelo mundo e continua inabalável em nossos dias.

A ciência de Leonardo, porém, é bem menos conhecida, embora ele tenha deixado volumosas notas e desenhos que descrevem seus experimentos, além de longas análises de suas descobertas, algumas das quais estavam séculos à frente de seu tempo. Com efeito, a meu ver, a criatividade científica de Leonardo, combinando curiosidade intelectual apaixonada com enorme paciência e poderoso engenho experimental, foi a essência de sua “alma” (como ele

certamente diria) – a principal força que o impulsionou na vida.

Leonardo sempre planejou publicar seus trabalhos científicos, mas nunca chegou a fazê-lo, e, embora os discutisse com alguns dos maiores intelectuais da época, jamais os pôs por escrito. Os contemporâneos de Leonardo sabiam que ele dedicava boa parte de seu tempo ao estudo da filosofia natural (como a ciência era chamada na época), mas quase todos ignoravam sobre o quê versavam esses estudos.

Como todos os pintores do Renascimento, Leonardo tinha discípulos e partilhava generosamente com eles seu conhecimento de pintura, no ateliê e em notas escritas. Como cientista, porém, não tinha alunos e não publicava suas descobertas. Cem anos antes de Galileu e Bacon, ele desenvolveu sozinho a abordagem empírica hoje conhecida como método científico. Entretanto, não via a ciência como um empreendimento coletivo, da maneira como a vemos agora. Nisso – e só nisso – ele não era um cientista na acepção moderna.

Nos séculos que se seguiram à morte de Leonardo, seus famosos Cadernos se espalharam por toda a Europa. Alguns foram desmembrados arbitrariamente e depois remontados em diversas coleções. Mais da metade dos manuscritos desapareceu e o resto ficou guardado em bibliotecas públicas e privadas. Em sua grande maioria, só vieram à luz no final do século XIX, quando foram finalmente transcritos e publicados.

Apesar do destino trágico e turbulento dos Cadernos, preservaram-se mais de 6 mil páginas de seus textos e

desenhos magníficos. Estão arquivados em vários museus e disponíveis também em edições fac-similares. Esses manuscritos nos mostram Leonardo da Vinci como um pioneiro único da ciência moderna em muitas disciplinas, da hidrodinâmica, geologia e botânica à mecânica, aerodinâmica e anatomia.

Em meu livro anterior, *The Science of Leonardo*,* apresentei uma interpretação nova da abordagem de Leonardo como ciência de formas orgânicas, radicalmente diversa da ciência mecanicista que surgiu dois séculos após sua morte. O livro é uma introdução à sua vida e personalidade, seu gênio, seu método científico e sua síntese ímpar de arte e ciência, da máxima relevância para o nosso tempo.

Nesta obra, dou um passo à frente, apresentando uma análise aprofundada dos principais ramos do empreendimento científico de Leonardo, da perspectiva do século XXI. O que emerge é, em minha opinião,

um quadro coerente e unificador dos fenômenos naturais – bem diverso do de Galileu, Descartes e Newton.

Em décadas anteriores, os estudiosos dos célebres cadernos de notas de Leonardo costumavam vê-los como trabalhos desorganizados e caóticos. Acredito, porém, que na mente de Leonardo sua ciência não fosse nem um pouco desorganizada. Nos manuscritos, encontramos inúmeros lembretes sobre o modo como, por fim, talvez conseguisse integrar o corpo inteiro da pesquisa num todo coerente. Tentei seguir essas pistas, dispondo o material do presente livro segundo um esquema que, a meu ver, se harmoniza

com o pensamento de Leonardo. A base conceitual da ciência de Leonardo é uma teoria detalhada e sofisticada da percepção e do conhecimento. Seu método empírico pressupunha uma observação cuidadosa e sistemática da natureza, o que incluía uma análise abran - gente do processo em si da observação. O método científico de Leonardo, bem como sua teoria da percepção e do conhecimento, foram discutidos com grande minúcia em meu livro an terior e eu resumo os pontos principais na Introdução que se segue. Neste livro, analiso sua visão dos fenômenos naturais, extraída em parte das tradicionais ideias aristotélicas e medievais, mas em parte também de suas próprias observações independentes e meticulosas da natureza. O resultado é uma ciência original das formas vivas com seus contínuos movimentos, mudanças e transformações – uma ciência de padrões e qualidades.

Uma ideia fundamental nela implícita é que a natureza, como um todo, está viva e que os padrões e processos do macrocosmo da Terra são similares aos do microcosmo do corpo humano. Dividi os conteúdos da obra científica de Leonardo nestas duas categorias básicas: formas e transformações da natureza no macrocosmo e no microcosmo. Elas constituem a Parte I e a Parte II do livro.

No macrocosmo, os principais temas da ciência de Leonardo são os movimentos da água e do ar (Capítulo 1), as formas e transformações geológicas da Terra viva (Capítulo 2), a diversidade botânica e os padrões de crescimento das plantas (Capítulo 3). No microcosmo, o principal enfoque é no corpo humano: sua beleza e proporções (Capítulo 4), a mecânica de seus movimentos

(Capítulo 6) e sua comparação com os corpos de outros animais em termos de movimento, sobretudo o voo dos pássaros (Capítulo 7).

Ao contrário de Descartes, Leonardo não via o corpo como uma máquina, mas reconhecia claramente que as anatomias animal e humana implicam funções mecânicas só perceptíveis por meio da compreensão dos princípios fundamentais da mecânica. Consequentemente, propunha-se "dispor as coisas de tal maneira que o [capítulo] sobre os elementos de mecânica com sua prática preceda a demonstração do movimento e da força tanto do homem quanto dos outros animais". Segui o conselho de Leonardo. "Os Elementos da Mecânica" (Capítulo 5) precedem "O Corpo em Movimento" (Capítulo 6).

No nível mais fundamental, Leonardo sempre procurou entender a natureza da vida. Essa busca persistente culminou em suas anatomias do coração e dos vasos sanguíneos, assim como nos estudos de embriologia que empreendeu já em idade avançada. Suas investigações do mistério da vida no corpo humano (Capítulo 8) constituem o ápice de minha análise da ciência de Leonardo.

Para Leonardo, entender um fenômeno significava sempre associá-lo a outros fenômenos levando em conta uma similaridade de padrões. Ele costumava trabalhar em vários projetos ao mesmo tempo e, quando sua compreensão avançava numa área, revisava de acordo com essa compreensão suas ideias em áreas relacionadas. Assim, para bem apreciar a extensão de seu gênio científico, temos de estar sempre atentos à evolução de seu pensamento em várias disciplinas paralelas, mas

interconectadas, o que é muito difícil de fazer dentro das constrições lineares da língua escrita. Tentei facilitar essa tarefa incluindo em meu texto uma rede de referências cruzadas, bem como copiosas alusões aos manuscritos de Leonardo e às obras dos principais estudiosos do mestre. Além disso, compilei uma breve cronologia da vida e dos trabalhos de Leonardo (Apêndice A), que mostra até que ponto ele se envolvia constantemente em diversos projetos simultâneos.

Neste livro e em *A Ciência de Leonardo da Vinci*, examinei mais de cem descobertas científicas feitas por Leonardo da Vinci nos séculos XV e XVI, algumas delas centenas de anos à frente de seu tempo. No Apêndice B, catalogo cerca de cinquenta de suas descobertas mais importantes, juntamente com indicações dos séculos em que foram retomadas por outros cientistas. Esse resumo gráfico dá uma boa ideia do gênio pioneiro de Leonardo em inúmeros campos científicos.

Como Leonardo deixou de publicar suas descobertas, não teve influência direta sobre os cientistas que vieram depois dele. Hoje, desenvolvendo uma nova compreensão sistêmica da vida com forte ênfase na complexidade, nas redes e nos padrões de organização, testemunhamos o aparecimento gradual de uma ciência de qualidades que apresenta certas semelhanças gritantes com a ciência das formas vivas de Leonardo. Não podemos deixar de nos perguntar como a ciência ocidental teria evoluído se os cadernos de notas de Leonardo houvessem sido estudados pelos fundadores da Revolução Científica no século XVII.

Por sua correspondência, é evidente que Galileu, Newton e seus contemporâneos se defrontaram com os mesmos problemas que Leonardo identificou e frequentemente resolveu um ou dois séculos antes. Além disso, eles empregavam metáforas similares e raciocinavam de modo parecido, estando portanto à altura de entender melhor os cadernos de notas do que nós atualmente. Caso tomassem conhecimento das descobertas de Leonardo, o progresso da ciência teria sem dúvida enveredado por um caminho bem diferente e a influência de Leonardo da Vinci no pensamento científico seria tão profunda quanto seu impacto na história da arte.

Fritjof Capra
Berkeley, dezembro de 2010

* *A Ciência de Leonardo da Vinci*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 2008.

INTRODUÇÃO

A ciência das formas vivas de Leonardo

Em meados do século XV, quando o jovem Leonardo estudava pintura, escultura e engenharia em Florença, a ciência, no sentido moderno de método empírico sistemático para conhecer o mundo natural, não existia.[1] A visão de mundo da filosofia natural, como era chamada na época, fora transmitida por Aristóteles e outros filósofos da Antiguidade, fundindo-se depois com a doutrina cristã por obra dos teólogos escolásticos, que a apresentaram como o credo oficialmente aceito. As autoridades condenavam as experiências científicas como subversivas e encaravam qualquer crítica à ciência aristotélica como um ataque à Igreja. Leonardo da Vinci rompeu com essa tradição:

> Antes de mais nada, faço a experiência, pois minha intenção é apresentá-la primeiro; em seguida, com a ajuda do raciocínio, mostro por que ela opera daquela maneira. Essa é a regra certa pela qual os que investigam os fatos da natureza devem se pautar.[2]

Cem anos antes de Galileu e Bacon, Leonardo desenvolveu sozinho uma nova abordagem empírica à

ciência que englobava a observação sistemática da natureza, o raciocínio lógico e algumas formulações matemáticas – as principais características do que é hoje conhecido como método científico.[3]

Por ser filho ilegítimo, Leonardo foi proibido de frequentar a universidade. Isso significa que não sabia bem o latim e, por isso, não lia os livros eruditos da época, com exceção de alguns textos já traduzidos para o vernáculo.[4] Significa ainda que não era versado nas regras da retórica empregada nas discussões filosóficas. Leonardo se esforçou para superar essas deficiências estudando sozinho várias disciplinas, consultando especialistas quando podia e montando uma biblioteca pessoal considerável. Por outro lado, compreendeu que não ser constrangido pelas regras da retórica clássica era uma vantagem, pois isso lhe permitiria aprender diretamente da natureza, sobretudo quando suas observações contrariassem as ideias convencionais. “Estou plenamente consciente de que alguns presunçosos se julgarão no direito de desacreditar-me, por não ser eu um letrado”, escreveu em defesa própria. “Insensatos! Ignoram que minhas disciplinas valem mais porque derivam da experiência e não das palavras dos outros. A experiência é a amante daqueles que escreveram bem”.[5]

Por quarenta anos, Leonardo recolheu suas extensas observações e pensamentos nos famosos cadernos de notas, juntamente com descrições de centenas de experimentos, rascunhos de cartas, desenhos arquitetônicos e tecnológicos, e lembretes a si mesmo para futuras pesquisas e escritos. Praticamente todas as páginas dos

cadernos de notas estão repletas de textos (em escrita especular, da direita para a esquerda) e de magníficos desenhos. Calcula-se que a coleção toda chegasse a 13 mil páginas quando Leonardo morreu (sem tê-las publicado, o que certamente planejava fazer). Nos séculos que se seguiram, cerca de metade da coleção original se perdeu, mas cerca de 6 mil páginas foram preservadas. Os manuscritos estão hoje amplamente dispersos por bibliotecas, museus e coleções privadas, alguns em grandes compilações chamadas códices, outros como páginas dispersas ou fólios separados e outros ainda, em menor número, na encadernação original.[6]

O pleno alcance do método de investigação científica de Leonardo só foi avaliado recentemente, graças à datação exata de suas notas, o que agora torna possível acompanhar o desenvolvimento de suas ideias e técnicas. Durante séculos, publicaram-se extratos dos cadernos de notas, dispostos conforme a matéria, que muitas vezes apresentavam observações contraditórias de diferentes períodos da vida de Leonardo. Mas nas últimas quatro décadas os cadernos de notas foram finalmente datados com precisão.

O exame crítico e a datação desses manuscritos transformaram-se, eles próprios, numa ciência sofisticada. Ela implica não apenas a determinação das datas verdadeiras, alusões a eventos externos e inúmeras referências cruzadas no texto, mas também uma análise meticulosa da evolução do estilo de escrita e desenho de Leonardo ao longo de sua vida; o uso de diferentes tipos de papel, penas, tintas e outros materiais de escrita em

diferentes épocas; e, finalmente, a comparação e reunião de uma grande quantidade de manchas, rasuras, dobras especiais e todos os tipos de marcas acrescentadas por vários colecionadores durante séculos.

Como resultado desse árduo trabalho, realizado por várias décadas sob a orientação do eminente estudioso de Leonardo, Carlo Pedretti, todos os manuscritos estão agora publicados em edições fac-similares, juntamente com versões cuidadosamente transcritas, datadas e anotadas dos textos originais.[7] Essas publicações eruditas possibilitaram reconhecer a evolução das ideias teóricas de Leonardo e o gradual aperfeiçoamento de seus métodos de observação, portanto avaliar aspectos de sua abordagem científica que antes não podiam ser reconhecidos.[8]

Leonardo da Vinci foi o que chamaríamos hoje, no jargão científico, um pensador sistêmico. Para ele, compreender um fenômeno significava conectá-lo a outros. Quase sempre trabalhava em vários problemas simultaneamente, dando especial atenção a similaridades de formas e processos nas diferentes áreas de investigação – por exemplo, entre forças transmitidas por roldanas e alavancas e forças transmitidas por músculos, tendões e ossos; entre padrões de turbulência na água e no ar; entre o fluxo da seiva nas plantas e o fluxo do sangue no corpo humano.

Quando avançava na compreensão de fenômenos naturais numa área, detectava sempre as analogias e padrões interconectados com fenômenos que se manifestavam em outras áreas, revisando suas ideias teóricas de acordo com a descoberta. Esse método lhe

permitiu abordar várias questões não apenas uma, mas muitas vezes em diferentes períodos de sua vida e modificar suas teorias em passos sucessivos, à medida que seu pensamento científico se aprofundava ao longo da vida.

O método de Leonardo de reavaliar ideias teóricas em várias áreas significa que ele jamais considerava nenhuma de suas explicações “defi - nitiva”. Embora Leonardo acreditasse na certeza do conhecimento científico, como tantos outros filósofos e cientistas ao longo dos trezentos anos seguintes, suas sucessivas formulações teóricas em diversos campos são muito parecidas aos modelos teóricos que caracterizam a ciência moderna. Ele propôs, por exemplo, diferentes modelos para o funcionamento do coração e seu papel no controle do fluxo sanguíneo antes de concluir que esse órgão é um músculo cuja função consiste em bombear o sangue pelas artérias.[9] Leonardo usava também modelos simplificados – aproximações, como hoje diríamos – para analisar os aspectos essenciais de fenômenos complexos. Por exemplo, representava o fluxo de água por um canal de seção transversal variável recorrendo ao modelo de fileiras de homens marchando por uma rua de largura variável.[10]

Como os cientistas modernos, Leonardo nunca hesitava em revisar seus modelos quando percebia que novas observações e ideias exigiam esse procedimento. Na arte como na ciência, ele sempre parecia interessar-se mais pelo processo de pesquisa do que pela obra acabada ou o resultado final. Por isso, muitas de suas pinturas e toda a sua ciência permaneceram inacabadas, como obra em desenvolvimento.

Essa é uma característica geral do moderno método científico. Embora os cientistas publiquem seus trabalhos por etapas, à medida que vão se desenvolvendo, em artigos, monografias e livros, a ciência como um todo é sempre uma obra em desenvolvimento. Teorias e modelos antigos vão sendo substituídos por outros novos, tidos como superiores, mas ainda assim limitados e aproximativos, fadados a ser substituídos também à medida que o conhecimento progride.

Desde a Revolução Científica no século XVII, o progresso da ciência tem sido uma tarefa coletiva. Os cientistas continuamente trocavam cartas, artigos e livros, além de discutir suas teorias em conferências. Esse intercâmbio constante de ideias é bem documentado e torna fácil para os historiadores acompanhar a evolução da ciência ao longo dos séculos.

Com Leonardo, a situação é muito diferente. Ele trabalhava sozinho e em segredo, não publicava nenhum de seus achados e só raramente datava suas notas.[11] Pioneiro solitário do método científico, não via a ciência como um empreendimento coletivo, solidário. Em vida, portanto, só ele mesmo sabia dos avanços de sua ciência; e os modernos estudiosos precisaram empenhar-se num meticuloso trabalho de investigação para reconstituir a evolução de seu pensamento científico.

A discrição de Leonardo sobre sua obra científica é um dos aspectos significativos pelo qual não podemos considerá-lo cientista na acepção moderna. Se ele tivesse compartilhado e discutido suas descobertas com os intelectuais da época, sua influência no desenvolvimento da

ciência ocidental poderia ter sido tão profunda quanto o impacto que exerceu na história da arte. Ao contrário, pouco influenciou os cientistas que vieram depois dele, pois sua obra permaneceu oculta em vida e continuou encerrada nos cadernos de notas por muito tempo após sua morte.

O método científico de Leonardo não se baseava somente na observação cuidadosa e sistemática da natureza, mas incluía também uma análise detalhada e abrangente dos processos de percepção e conhecimento.[12] Ele iniciou suas pesquisas da percepção estudando a perspectiva, essa notável inovação da arte renascentista. “A pintura se fundamenta na perspectiva”, explicava, “e a perspectiva nada mais é que o conhecimento profundo da função do olho.”[13] A partir da perspectiva, Leonardo avançou em duas direções opostas – para dentro e para fora, por assim dizer. Investigou a geometria dos raios de luz, conhecida hoje como óptica geométrica, o jogo de luz e sombra, e até a natureza da luz; também estudou a anatomia do olho, a fisiologia da visão e a trajetória das impressões sensoriais ao longo dos nervos até a “sede da alma”.

Para o cientista moderno, acostumado à fragmentação exasperante das disciplinas acadêmicas, é surpreendente ver como Leonardo transitava rapidamente da perspectiva e dos efeitos de luz e sombra para a natureza da luz, o trajeto dos nervos ópticos e as funções da alma. Sem carregar o fardo da divisão mente-corpo que Descartes introduziria 150 anos depois, Leonardo não separava a epistemologia (a teoria do conhecimento) da ontologia (a teoria do que existe no mundo), e nem mesmo a filosofia da ciência e a da arte.

Suas abrangentes investigações de todo o processo da percepção levaram-no a formular ideias muito originais sobre a relação entre realidade física e processos cognitivos, que só reapareceram muito recentemente com o desenvolvimento de uma ciência cognitiva pós-cartesiana.[14]

A abordagem de Leonardo do conhecimento científico era visual – a abordagem de um pintor. "Pintar", declarou ele, "engloba todas as formas da natureza."[15] Na minha opinião, esta afirmação é a chave para compreender a ciência de Leonardo da Vinci. Ele sustenta repetidamente, sobretudo nos primeiros manuscritos, que a pintura pressupõe o estudo das formas naturais, enfatizando a ligação íntima entre a representação artística dessas formas e a compreensão intelectual de sua natureza e princípios subjacentes. Por exemplo, na coleção de notas sobre pintura, conhecida como *Trattato della Pittura* (*Tratado de Pintura*), Leonardo escreve:

> [A pintura] feita a partir de sutis especulações filosóficas leva em conta todas as qualidades das formas (...). Isso é verdadeiramente ciência, filha legítima da natureza, pois é da natureza que a pintura nasce.[16]

Para melhor compreender a síntese de Leonardo de arte e ciência, precisamos ter em mente o seguinte: na época de Leonardo, esses termos não eram usados no sentido que hoje lhes atribuímos. Para seus contemporâneos, *arte* significava "habilidade" (na acepção que ainda lhe damos quando dizemos, por exemplo, "a arte da medicina"), enquanto *scientia* significava "conhecimento" ou "teoria". Leonardo insiste várias vezes em que a "arte" ou habilidade de pintar tem de ser secundada pela "ciência" do pintor, isto é, pelo conhecimento profundo das formas vivas, pela

compreensão intelectual da natureza intrínseca dessas formas.

Além do intelecto penetrante, dos poderes de observação, da engenhosidade experimental e do grande talento artístico, Leonardo possuía também muito senso prático. Quando empreendia uma investigação das formas da natureza, vendo-as com olhos de cientista e pintor, nunca deixava de avaliar as aplicações de suas descobertas. Passou boa parte da vida inventando máquinas de todos os tipos, imaginando aparelhos mecânicos e ópticos, projetando edifícios, jardins e cidades.

Quando estudava a água, encarava-a não só como o veículo da vida e a força propulsora da natureza, mas também como uma fonte de força para sistemas industriais, mais ou menos como o papel que o vapor – outra forma de água – desempenharia na Revolução Industrial três séculos mais tarde. Suas extensas pesquisas dos fluxos de ar e vento, bem como do voo dos pássaros, deram-lhe a oportunidade de conceber máquinas voadoras, muitas delas baseadas em sólidos princípios aerodinâmicos. De fato, as realizações de Leonardo como projetista e engenheiro nada ficam a dever às que logrou como artista e cientista.[17]

Assim, para Leonardo, a pintura era ao mesmo tempo arte e ciência – ciência de formas naturais, qualidades, muito diferente da ciência mecanicista que surgiria duzentos anos depois. As formas de Leonardo são formas vivas, continuamente moldadas e transformadas por processos intrínsecos. Ao longo da vida ele estudou, desenhou, pintou rochas e sedimentos da Terra esculpidos pela água; o crescimento das plantas, estimulado por seu

metabolismo; e a anatomia do corpo animal (e humano) em movimento.

A natureza como um todo era viva para Leonardo. A seu ver, os padrões e processos do microcosmo se identificavam com os do macrocosmo. Particularmente, ele costumava estabelecer analogias entre a anatomia humana e a estrutura da Terra. A analogia entre microcosmo e macrocosmo remonta à Antiguidade e foi bastante conhecida na Idade Média e no Renascimento. Articulada com maior ênfase por Platão no *Timeu*, no século IV a.C. já integrava os ensinamentos dos pitagóricos e de outras antigas escolas da filosofia grega. Mas a grande contribuição do pensamento de Leonardo foi o fato de ele ter dissociado o conceito de Terra viva de seu contexto mítico original, encarando-o como uma teoria estritamente científica que podemos reconhecer à primeira vista como precursora da atual teoria de Gaia – uma teoria científica que considera a Terra um sistema vivo, auto-organizador e autorregulador.[18]

No nível mais fundamental, Leonardo sempre procurou entender a natureza da vida. Isso muitas vezes escapou a seus primeiros comentadores porque, até recentemente, a natureza da vida era definida por biólogos apenas em termos de células e moléculas, a que Leonardo, dois séculos antes da invenção do microscópio, não tinha acesso. Hoje, porém, uma nova compreensão sistêmica da vida está surgindo na vanguarda da ciência – uma compreensão que leva em conta os processos metabólicos e seus padrões de organização, ou seja, justamente os fenômenos que Leonardo sempre investigou.

Conforme já vimos, a obra científica de Leonardo ficou praticamente desconhecida enquanto ele viveu e continuou oculta por mais de duzentos anos após sua morte, em 1519. Suas descobertas e ideias pioneiras não tiveram influência direta sobre os cientistas posteriores, embora, pelos 450 anos subsequentes, sua concepção de uma ciência das formas vivas ressurgisse em várias épocas. Nesses períodos, os problemas com que ele se defrontou foram retomados com níveis crescentes de sofisticação, à medida que os cientistas adquiriam mais conhecimentos da estrutura da matéria, das leis da química e do eletromagnetismo, da biologia celular e molecular, da genética e do papel decisivo da evolução na modelagem das formas do mundo vivo.

Hoje, do ponto de vista da ciência do século XXI, podemos reconhecer Leonardo da Vinci como um autêntico precursor de toda uma linhagem de cientistas e filósofos cujo enfoque central era a natureza da forma orgânica. Entre esses cientistas e filósofos estão Immanuel Kant, Alexander von Humboldt e Johann Wolfgang von Goethe, no século XVIII; Georges Cuvier, Charles Darwin e D'Arcy Thompson, no século XIX; Alexander Bogdanov, Ludwig von Bertalanffy e Vladimir Vernadsky, no início do século XX; e Gregory Bateson, Ilya Prigogine e Humberto Maturana, no final do século XX, devendo-se incluir também os morfologistas e os teóricos da complexidade contemporâneos.

A concepção orgânica da vida, de Leonardo, percorreu os séculos como uma corrente subterrânea, mas, por breves períodos, veio à tona e dominou o pensamento científico.

Entretanto, nenhum cientista da linhagem citada percebeu que o grande gênio da Renascença já aventara muitas das ideias que eles estavam explorando. Enquanto os manuscritos de Leonardo acumulavam poeira em antigas bibliote - cas europeias, Galileu Galilei era reverenciado como o “Pai da Ciência Moderna”.

Leonardo tinha plena consciência do papel importante da matemática na formulação de ideias científicas, bem como no registro e avaliação de experimentos. “Não se sabe”, escreveu nos cadernos de notas, “onde é impossível aplicar qualquer das ciências matemáticas ou as que estão a elas associadas.”[19] Insistia em usar a linguagem matemática para dar consistência e rigor às descrições de suas observações científicas. Infelizmente, na época, não havia uma linguagem matemática capaz de expressar o tipo de ciência que ele cultivava: a exploração das formas da natureza em seus movimentos e transformações. Precisou, pois, recorrer a seus poderes de observação e sua intuição privilegiada para testar novas técnicas que prenunciavam ramos da matemática que só seriam desenvolvidos séculos depois. Conforme discuti em *A Ciência de Leonardo da Vinci*, essas técnicas incluíram a teoria das funções, o cálculo integral e a topologia.[20]

Na Renascença, a matemática consistia de duas áreas principais, a geometria e a álgebra. A primeira fora herdada dos gregos, ao passo que a segunda fora desenvolvida principalmente pelos matemáticos árabes.[21] A geometria era considerada mais importante, sobretudo entre os artistas renascentistas, para quem representava os fundamentos da perspectiva e, portanto, os princípios

matemáticos da pintura. Leonardo partilhava plenamente essa visão. E, como sua abordagem da ciência era em grande parte visual, não é de surpreender que todo o seu pensamento matemático fosse geométrico. Nunca foi muito longe com a álgebra e até, por descuido, cometia frequentemente erros em simples cálculos aritméticos. Para ele, a matemática que importava era a geometria.

No entanto, percebeu desde cedo que a geometria euclidiana não era apropriada para descrever matematicamente as formas orgânicas da natureza. Um novo tipo de matemática qualitativa seria necessário para essa finalidade. Hoje, com efeito, essa nova matemática vem sendo formulada no âmbito da teoria da complexidade. Envolve equações não lineares complexas e modelagem computacional baseada na topologia, uma geometria de formas em movimento.[22]

Nada disso estava disponível a Leonardo, é claro, mas, fato curioso, ele trabalhou com uma versão rudimentar de topologia. Desenvolveu sistematicamente uma geometria especial que chamou de “geometria feita com movimento”, cujo papel era explicar transformações e movimentos contínuos. Um estudo meticuloso da geometria especial de Leonardo torna evidente que se trata mesmo de uma forma primitiva de topologia, criada cinco séculos antes de esse ramo crucial da matemática ser redescoberto e desenvolvido plenamente.[23]

Além disso, Leonardo introduziu outra inovação capital em sua ciência das formas vivas. Usou o talento artístico para produzir desenhos que são impressionantemente belos e, ao mesmo tempo, funcionam como diagramas

geométricos. Na visão de Leonardo, o desenho era o veículo perfeito para formular seus modelos conceituais – a "matemática" ideal para a ciência das formas orgânicas. Seu famoso desenho "Água Caindo sobre Água", por exemplo, não é um instantâneo realista de um jato de água caindo num lago e sim um diagrama esmerado da análise de Leonardo de vários tipos de turbulência provocados pelo impacto do jato.[24] O duplo papel dos desenhos de Leonardo – como arte e como instrumentos de análise científica – mostra-nos que sua ciência não pode ser entendida sem sua arte nem sua arte sem sua ciência. A fim de praticar sua arte, ele precisava da compreensão científica das formas da natureza; a fim de analisar as formas da natureza, ele precisava de habilidade artística para desenhá-las. Em minha opinião, essa é a essência da síntese de Leonardo de arte e ciência.

Como Galileu, Newton e as gerações seguintes de cientistas, Leonardo trabalhava a partir da premissa inicial de que o universo físico é fundamentalmente organizado, podendo, pois, suas relações causais ser compreendidas pela mente racional e expressas matematicamente. Empregava o termo "necessidade" para exprimir a natureza imutável dessas relações causais regulares. "A necessidade é tema e inventora, o eterno freio da natureza", escreveu por volta de 1493, pouco depois de iniciar seus primeiros estudos de matemática.[25]

Uma vez que a ciência de Leonardo era uma ciência de qualidades, de formas orgânicas com seus movimentos e transformações, a "necessidade" matemática por ele entrevista na natureza não era expressa em quantidades e

relações numéricas, mas em formas geométricas que continuamente se transformavam de acordo com leis e princípios rígidos.

Para Leonardo, “matemático” significava acima de tudo o modo lógico, rigoroso e coerente com que a natureza modelara, e continuamente remodelava, suas formas orgânicas.

Esse significado de “matemático” difere bastante do que lhe atribuíam os cientistas durante a Revolução Científica e os trezentos anos subsequentes. Mas não difere muito do que foi adotado por alguns dos principais matemáticos contemporâneos. O desenvolvimento recente da teoria da complexidade gerou uma nova linguagem matemática na qual a dinâmica dos sistemas complexos – inclusive os fluxos turbulentos e os padrões de crescimento das plantas estudados por Leonardo – não é mais representada por relações algébricas e sim por formas geométricas que são analisadas em termos de conceitos topológicos.[26]

Essa nova matemática é, naturalmente, bem mais abstrata e sofisticada do que qualquer coisa que Leonardo pudesse imaginar nos séculos XIV e XV. Mas é usada no mesmo espírito em que ele desenvolveu sua “geometria feita com movimento” – a fim de mostrar, com rigor matemático, que os fenômenos naturais complexos são moldados e transformados pela “necessidade” das forças físicas. A matemática da complexidade levou a uma nova visão da geometria e à constatação ampla de que a matemática é muito mais que fórmulas e equações. Como

Leonardo da Vinci há quinhentos anos, os matemáticos modernos revelam-nos que a compreensão de padrões, relações e transformações é crucial para entender o mundo vivo à nossa volta e que todas as questões de padrões, ordem e coerência são, em última análise, questões matemáticas.

Leonardo iniciou os estudos das formas vivas da natureza como pintor; só depois empreendeu pesquisas detalhadas sobre sua natureza intrínseca. A ciência de Leonardo é uma ciência de qualidades. Ele preferia *pintar* as formas da natureza em vez de *descrevê-las* e analisava-as em termos de proporções, não de quantidades mensuráveis. De qualquer modo, medidas absolutas não eram tão acuradas nem tão importantes em sua época quanto são hoje. Por exemplo, as unidades-padrão de comprimento e peso – o *braccio* (braça) e a libra – variavam nas cidades italianas, de Florença a Milão e a Roma, diferindo também em valor nos países europeus vizinhos.

Leonardo sempre ficou impressionado com a enorme variedade e diversidade de formas vivas. “A natureza é tão aprazível e abundante em suas variações”, escreveu ele numa passagem sobre como pintar árvores, “que entre árvores de um mesmo tipo não se encontrará nenhuma igual a outra; e isso não é verdadeiro apenas para a planta como um todo, mas também para os galhos, as folhas e os frutos: jamais se verá um exatamente igual a outro.”[27] Via nessa multiplicidade infinita uma característica-chave das formas vivas e tentou até classificar as formas que estudava em diferentes tipos. Quando observava essas formas, registrava seus traços essenciais em desenhos e diagramas,

classificava-as em tipos, se possível, e tentava entender os processos e as forças que presidiam à sua formação.

Indo além das variações numa espécie particular, Leonardo atentava para similaridades de formas orgânicas em espécies diferentes e em similaridades de padrões em diferentes fenômenos naturais. Os cadernos de notas trazem incontáveis desenhos desses padrões – similaridades anatômicas entre a perna de um homem e a de um cavalo, entre redemoinhos de água e folhagens espiraladas de certas plantas, entre o fluxo da água e a agitação dos cabelos humanos etc. Em todos esses casos, ele percebeu intuitivamente que todas as formas vivas exibem similaridades de padrões. Hoje, explicamos esses padrões em termos de estruturas celulares microscópicas, de processos metabólicos e evolucionários. Leonardo, é óbvio, não tinha acesso a esses níveis de explicação, mas percebeu corretamente que, por intermédio da criação (ou evolução, como diríamos hoje) de uma grande diversidade de formas, a natureza empregou repetidamente os mesmos padrões básicos de organização.

A ciência de Leonardo é completamente dinâmica. Ele pinta as formas da natureza – montanhas, rios, plantas e o corpo humano – em perpétuo movimento e transformação. Percebendo que as formas vivas estão sendo continuamente modeladas e transformadas por processos intrínsecos, estuda as diversas maneiras pelas quais rochas e montanhas são esculpidas por fluxos turbulentos de água, tal qual o metabolismo faz às formas orgânicas das plantas, animais e corpos humanos. O mundo que Leonardo retrata, tanto na arte quanto na ciência, é um mundo em

desenvolvimento e fluxo no qual todas as configurações e formas não passam de etapas de um processo infindável de mudança.

PARTE I

FORMA E TRANSFORMAÇÃO NO MACROCOSMO

CAPÍTULO 1

Os movimentos da água
Leonardo da Vinci

Entre os quatro elementos clássicos, a água era o que, de longe, mais fascinava Leonardo. A vida inteira ele estudou seus movimentos e fluxos, desenhou e analisou suas ondas e vórtices, especulou a respeito de seu papel como o "veículo da natureza" (*vetturale della natura*) por excelência no macrocosmo da Terra viva e no microcosmo do corpo humano.[1]

As notas e desenhos de Leonardo que ilustram suas observações e ideias sobre o movimento da água enchem centenas de páginas dos cadernos de notas. Incluem esquemas conceituais minuciosos e partes de tratados no Codex Leicester e nos Manuscritos F e H, bem como incontáveis esboços e anotações disseminados pelo Codex Atlanticus, o Codex Arundel, a Coleção Windsor, os Codices Madrid e os Manuscritos A, E, G, I, K e L.[2] A quantidade de escritos de Leonardo sobre a água obviamente impressionou os contemporâneos e as sucessivas gerações de historiadores. Na verdade, afora a pintura, a água foi o único tema do qual se fez uma extensa compilação de transcrições manuscritas de seus cadernos de notas. A

coleção de notas, transcritas no século XVII em 230 fólios, foi publicada em 1828 em Bolonha, com o título de *Della Natura, Peso, e Moto dell'Acque* ("Da Natureza, Peso e Movimento da Água").[3]

VEÍCULO E MATRIZ DA VIDA

Há várias razões pelas quais Leonardo era tão fascinado pela natureza e os movimentos da água. Creio que, em última análise, todas têm algo a ver com seu empenho persistente em entender a natureza da vida, que inspirou tanto sua ciência quanto sua arte. A ciência de Leonardo é uma ciência de formas vivas, orgânicas, e ele reconheceu claramente que todas as formas orgânicas são sustentadas e nutridas pela água: "Ela é a expansão e o humor de todos os corpos vivos. Sem ela nada retém sua forma original."[4]

O termo "humor" é usado aqui no sentido medieval de fluido corporal nutritivo. Em outro caderno de notas, Leonardo escreve: "[A água] move os humores de todos os tipos de corpos vivos."[5] Sendo pintor, ele conhecia bem a água como solvente e descreveu essa propriedade química com precisão: "Em si nada é, mas move e absorve o resto, como se vê claramente quando destilada."[6]

A visão de Leonardo do papel essencial da água na vida biológica é plenamente corroborada pela ciência moderna. Hoje, sabemos não só que todos os organismos vivos precisam de água para o transporte de nutrientes até os tecidos como também que a vida na Terra começou nela. As primeiras células vivas surgiram nos oceanos primordiais há mais de três bilhões de anos e, desde então, todas as

células que compõem organismos vivos continuaram a florescer e a evoluir em ambientes aquáticos. Leonardo estava absolutamente certo em ver na água o veículo e a matriz da vida.

Um dos princípios fundamentais da ciência de Leonardo é a similaridade de padrões e processos no macrocosmo e no microcosmo. Por isso comparou as “veias de água” da Terra com os vasos de sangue do corpo humano.[7] Assim como o sangue nutre os tecidos do corpo, a água alimenta a vegetação da Terra com sua “umidade vivificante”.[8] E, assim como a água se expande quando o calor do sol a vaporiza, “misturando-se com o ar”, o sangue, graças à sua tepidez, espalha-se pela periferia do corpo.[9] Com efeito, veremos que Leonardo descreveu em pormenor o processo pelo qual o sangue carrega nutrientes para os tecidos e que desenvolveu uma teoria engenhosa, embora incorreta, sobre como o calor do corpo é gerado pelos fluxos turbulentos do sangue nas câmaras do coração.[10]

Em suas pinturas, Leonardo representava a água como o veículo da vida não apenas no sentido científico, mas também simbolicamente, no sentido religioso. Segundo a teologia cristã que moldou a cultura na qual ele viveu, o fiel recebe uma nova vida espiritual graças ao sacramento do batismo e a água é o meio que transmite esse sacramento. Nas palavras da Bíblia, o batismo é o renascimento da água e do espírito (João 3:5). Várias pinturas de Leonardo apresentam variações desse tema religioso fundamental, muitas vezes integrando o simbolismo religioso a essa compreensão científica da qualidade vivificante da água.

Essa integração já aparece no primeiro registro que temos de Leonardo como pintor, quando ele ainda era aprendiz no ateliê de Andrea del Verrocchio, em Florença, Itália. Por volta de 1473, estando Leonardo com 21 anos, Verrocchio deixou que ele pintasse um dos dois anjos e partes do fundo do quadro *O Batismo de Cristo* (Gravura 1).[11]* Leonardo pintou uma larga e romântica extensão de colinas e picos do tipo que constituiria o fundo de várias de suas obras posteriores e a isso acrescentou um longo curso de água fluindo de um lago distante para o primeiro plano, onde forma pequenas ondas em torno das pernas de Cristo. Enquanto essas ondas representam a água vivificante do sacramento, o regato proveniente do fundo, atravessando rochas áridas até um vale fértil, mostra a água como o veículo da vida biológica no macrocosmo da Terra.

Esse tema é retomado e explicado em várias pinturas posteriores de Leonardo, sobretudo em três de suas obras-primas: *A Virgem do Rochedo* (Gravura 3), *Mona Lisa* (Gravura 12) e *A Virgem e o Menino com Santa Ana* (Gravura 5). Em *A Virgem do Rochedo*, Leonardo representa um encontro profético do Cristo e de São João meninos muito antes do Batismo. Segundo uma lenda do século XIV, esse encontro ocorreu durante a fuga da Sagrada Família para o Egito, onde viveram no deserto após escapar ao massacre dos inocentes decretado por Herodes. Leonardo colocou a cena diante de uma caverna rochosa e transformou-a numa meditação complexa sobre o destino de Cristo, expresso por meio dos gestos e das posições relativas dos quatro protagonistas, bem como do intricado simbolismo das pedras e da vegetação circundantes.[12] Um

anjo aponta claramente o Batista, atraindo nossa atenção para seu diálogo espiritual com Cristo, enquanto Maria protege ternamente as crianças com os braços estendidos.

Como em *O Batismo de Cristo* de Verrocchio, um regato de montanha brota a distância, emergindo da atmosfera enevoada que rodeia os píncaros e correndo em meio à paisagem rochosa para o primeiro plano, onde deságua numa pequena lagoa – alusão ao Batismo. Aqui, entretanto, as rochas aparecem com muito mais detalhes e com uma exatidão geológica notável,[13] sendo a vegetação luxuriante no ambiente úmido da gruta um claro testemunho dos poderes vivificantes da água, apresentada pelo artista numa síntese sutil de conhecimento científico e simbolismo religioso.[14]

A *Mona Lisa*, conforme já foi notado, é a meditação mais profunda de Leonardo sobre o mistério da origem da vida – o assunto que mais o absorveu na velhice. O tema central da pintura mais famosa do artista é a força de procriação da vida, tanto no corpo feminino quanto no seio da Terra viva. E, para essa força, o papel da água como elemento vivifi - cante é fundamental.[15]

O tema da origem da vida é retomado em *A Virgem e o Menino com Santa Ana*, que Leonardo pintou mais ou menos na mesma época da *Mona Lisa*. Aqui, o artista volta a explorar o mistério da vida num contexto religioso. O quadro mostra Maria, sua mãe Santa Ana e o Cristo ao lado de um cordeiro, numa composição altamente original. Sua mensagem teológica pode ser vista como uma sequência da longa meditação de Leonardo sobre o destino de Cristo, que começara com *A Virgem do Rochedo*.[16]

De novo, os conhecidos lagos de montanha e rochas denteadas se erguem bem alto no pano de fundo, embora menos imponentes que na *Mona Lisa*. Nas duas pinturas, o tema central é o mistério da origem da vida no corpo humano e no corpo da Terra. Em *A Virgem e o Menino com Santa Ana*, isso se torna mais complexo pela presença de três gerações e pelo mito do nascimento virginal. Há aqui um duplo mistério: a imaculada concepção de Maria por Santa Ana e do Cristo por Maria. E, para enfatizar a analogia entre microcosmo e macrocosmo, Leonardo espelhou as três gerações do primeiro plano em três renques de lagos montanhosos, interligados por pequenas cachoeiras, no pano de fundo.

O que esses quatro quadros – *O Batismo de Cristo, A Virgem do Rochedo*, a *Mona Lisa* e *Santa Ana* – têm em comum é a longa meditação de Leonardo sobre a água como elemento vivificante no macrocosmo da Terra e no microcosmo da existência humana. Recorrendo à sua compreensão científica, a seu gênio artístico e à sua grande familiaridade com o simbolismo religioso, Leonardo exprimiu essa meditação numa série de obras-primas que se tornaram ícones duradouros da arte europeia.

FORMAS FLUIDAS DA NATUREZA

Outro motivo pelo qual Leonardo era tão fascinado pela água é que a associava com a natureza fluida e dinâmica das formas orgânicas. Desde a Antiguidade, filósofos e cientistas reconheciam que a forma biológica é mais que contorno, mais que configuração estática de componentes

num todo. Há um fluxo contínuo de matéria pelo organismo vivo, mas sua forma se mantém; há crescimento e decadência, regeneração e desenvolvimento. Essa concepção dinâmica da natureza viva é um dos principais temas na ciência e na arte de Leonardo.[17] Ele pintava as formas da natureza – montanhas, rios, plantas e o corpo humano – em transformação e movimento perpétuos. E, sabendo que todas as formas orgânicas são sustentadas pela água, percebia uma conexão profunda entre sua fluidez e a fluidez da água.

Observando o fluxo do elemento vivificante, Leonardo se maravilhava com sua versatilidade e adaptabilidade infinitas. “A água corrente tem dentro de si um número incontável de movimentos”, anotou ele no Manuscrito G, “às vezes rápidos, outras vagarosos, para a direita, para a esquerda, para cima, para baixo, em redemoinho, em uma direção, em outra, todos obedecendo às forças que a movem.”[18] No Codex Atlanticus, escreveu: “Assim, unida a si mesma, a água gira numa revolução contínua. Correndo para um lado ou para outro, para cima ou para baixo, ela jamais repousa nem em seu curso nem em sua natureza. Não possui nada mas arrebata tudo, assumindo o caráter do lugar que cruza.”[19]

Além disso, Leonardo estudou cuidadosamente a ação da água na erosão das rochas e das margens dos rios, suas transformações nos corpos sólido e gasoso (conhecidas hoje como transições de fase) e suas propriedades como solvente químico. Nunca dividiu essas diversas propriedades em categorias separadas, vendo-as sempre como aspectos

diferentes do papel fundamental da água na nutrição e manutenção da vida:

> Sem descanso, não cessa de remover e consumir o que se atravessa em seu caminho. Assim, às vezes é turbulenta e avança furiosa, outras é límpida e tranquila, serpenteando alegremente, num curso sereno, entre verdes pastagens. Em certas ocasiões, despenca do céu como chuva, neve e granizo. Em outras, forma grandes nuvens com o levíssimo vapor. Às vezes, move-se por si mesma; outras, pela força alheia. Às vezes, aumenta as coisas nascidas de sua umidade vivificante. Outras, mostra-se fétida ou cheia de aromas agradáveis. Sem ela, nada existiria entre nós.[20]

Para Leonardo, as formas fluidas e perenemente mutáveis da água eram manifestações extremas da fluidez que ele via como a característica fundamental de todas as formas da natureza. Mas notou também que certos fluxos de água podem produzir formas surpreendentemente estáveis: redemoinhos, vórtices e outros tipos de turbulência que hoje os cientistas chamam de estruturas coerentes.[21] Leonardo observou e esboçou uma grande variedade dessas estruturas turbulentas relativamente estáveis e, a meu ver, seu fascínio duradouro por elas originou-se da intuição profunda de que, de algum modo, elas encerravam um aspecto essencial das formas vivas, orgânicas.

Do ponto de vista moderno da teoria da complexidade e da teoria dos sistemas vivos, podemos afirmar que a intuição de Leonardo estava absolutamente correta. A característica fundamental de um vórtice de água – por exemplo, o redemoinho que se forma quando a água escorre por um ralo – é que ela combina estabilidade e mudança. A água flui sem parar pelo vórtice, mas sua forma característica, as conhecidas espirais que vão se afunilando, continua curiosamente estável. A coexistência de

estabilidade e mudança também é característica de todos os sistemas vivos, conforme os teóricos da complexidade e dos sistemas reconheceram no século XX.[22]

O processo do metabolismo, típico da vida biológica, envolve um fluxo contínuo de energia e matéria pelo organismo vivo – a ingestão/ digestão de nutrientes e a excreção de produtos residuais –, enquanto sua forma é preservada. Assim, metaforicamente, podemos visualizar um organismo vivo como um redemoinho, embora os processos metabólicos em ação não sejam mecânicos e sim químicos.

Leonardo nunca usou a analogia entre a dinâmica de um vórtice de água e a do metabolismo biológico, pelo menos nos cadernos de notas que chegaram até nós. No entanto, conhecia bem a natureza dos processos metabólicos. De fato, conforme veremos, sua descrição pormenorizada do metabolismo dos tecidos em conexão com o fluxo do sangue no corpo humano pode ser vista como uma percepção científica das mais impressionantes.[23] Portanto, não é ir muito longe presumir que ele era tão fascinado por redemoinhos e vórtices porque, intuitivamente, reconhecia-os como símbolos da vida – estável e, ao mesmo tempo, continuamente mutável.

UMA FONTE DE PODER

Leonardo via a água não apenas como o elemento vivificante, mas também como a principal força modeladora da superfície da Terra e como uma enorme fonte de poder, que poderia ser aproveitada pelo engenho humano. Em sua

época, trezentos anos antes da Revolução Industrial, o moinho de vento, a roda de água e os músculos dos animais eram a única força à disposição da tecnologia e, entre todas, Leonardo achava que a água é que tinha o maior potencial. Aos 50 anos de idade, famoso como pintor em toda a Europa e reconhecido como um dos mais talentosos engenheiros hidráulicos e militares da Itália, imaginou um grande projeto para uma espécie de canal “industrial” ao longo do rio Arno, entre Florença e Pisa.[24] Segundo seus cálculos, esse canal propiciaria irrigação para os campos vizinhos e energia para numerosas fábricas de seda e papel, moveria tornos de oleiro, serraria madeira, forjaria ferro, poliria armas e afiaria metais.[25] O ambicioso projeto de Leonardo nunca se concretizou, mas era uma visão profética. Séculos depois, a força do vapor e da hidroeletricidade de fato transformariam a civilização humana.

Engenheiro, Leonardo também sabia do poder destrutivo da água. Nas planícies do norte da Itália, ao pé dos Alpes, um complexo sistema de canais fora construído para irrigação e navegação comercial, mas a grande preocupação dos engenheiros hidráulicos era como proteger esses canais das cheias de seus afluentes.[26] As cheias ocorriam periodicamente durante as pesadas chuvas de outono e depois de um derretimento súbito, na primavera, das neves alpinas. Leonardo refletia muito sobre essas inundações, que podiam ser muito violentas. Não bastasse isso, testemunhara uma cheia catastrófica do Arno em sua Toscana nativa, quando tinha 14 anos. Essa experiência de infância deve ter deixado nele uma impressão profunda e

foi, talvez, a causa de seu fascínio mórbido com enchentes, que considerava o mais assustador de todos os eventos cataclísmicos.[27] “Não tenho palavras para descrever esses males abomináveis e aterradores, contra os quais não há defesa humana”, escreveu no Codex Atlanticus. “Com suas vagas intumescidas, a água devasta altas montanhas, destrói as barragens mais fortes e arranca as árvores mais firmemente enraizadas. E, em ondas vorazes, prenhes da lama dos campos arados, leva embora o fruto do trabalho árduo dos miseráveis e fatigados trabalhadores do solo, despojando e desnudando os vales com a pobreza que deixa em sua esteira.”[28]

Como engenheiro hidráulico, Leonardo inventou máquinas especiais para abrir canais, melhorar o sistema existente de comportas, drenar pântanos e desviar o curso de rios a fim de prevenir danos às propriedades ribeirinhas. Como arquiteto, projetou jardins requintados com fontes esplêndidas, água corrente para refrescar o vinho, sistemas de aspersão para borrifar convidados durante o calor do verão e instrumentos musicais automáticos acionados por aparelhos movidos a água.[29]

Leonardo decidiu, desde cedo, que sua reputação e habilidades na engenharia hidráulica e no paisagismo se baseariam numa ampla compreensão do fluxo da água. Assim, tanto na ciência quanto na arte, nunca se cansou de observar, analisar, desenhar, pintar e estudar o modo como a água se move no ar, nos vasos sanguíneos do corpo humano, nos tecidos vasculares das plantas, nos mares e rios da Terra viva.

O CICLO DA ÁGUA

Uma vez que a ciência de Leonardo se baseava em repetidas observações de fenômenos naturais combinadas com meticulosas análises, não é de surpreender que tivesse uma compreensão acurada da evaporação e condensação da água, podendo assim descrevê-las com clareza. “Facilmente sobe como vapor e neblina”, escreveu no Manuscrito A, “e, convertida em nuvens, cai como chuva porque as partes minúsculas da nuvem se juntam para formar gotas.”[30] Uma descrição um pouco mais detalhada aparece no Codex Arundel:

> Às vezes, banhada pelo elemento quente, dissolve-se em vapor e mistura-se com o ar; empurrada para cima pelo calor, sobe até que, encontrando a região fria, é comprimida por sua natureza contrária e as partículas minúsculas se juntam.[31]

Ele tinha igualmente plena consciência da circulação contínua da água pela terra e pela atmosfera: “Podemos concluir que a água passa dos rios para o mar e do mar para os rios, indo e vindo constantemente.”[32] Tomadas em conjunto, essas declarações parecem indicar que Leonardo adquirira uma compreensão clara das fases essenciais do ciclo da água: com efeito esta, aquecida nos oceanos pelo sol, evapora-se no ar, sobe pela atmosfera até que temperaturas mais baixas a fazem se condensar em nuvens, cujas partículas minúsculas se agregam em gotas maiores e se precipitam em forma de chuva ou neve, que, levadas para os rios, retornam aos oceanos.

Na verdade, porém, a visão que Leonardo tinha do ciclo da água não era nada clara. Ele considerou diversas explicações diferentes, lutando com elas anos a fio porque

nenhuma satisfazia sua mente crítica, e só chegou à concepção correta nos últimos anos, no início dos seus 60 anos. Como entender isso? O que impediu, durante tanto tempo, um homem de semelhante gênio de captar um processo natural que hoje nos parece tão evidente?

A resposta ao enigma fornece um fascinante exemplo do tremendo poder do quadro filosófico atualmente conhecido como paradigma científico: a constelação de conceitos, valores e percepções que formam o contexto intelectual de todas as investigações científicas.[33] Um dos fundamentos da visão de mundo medieval era a certeza de que a natureza como um todo estava viva, de que todos os padrões e processos do macrocosmo identificavam-se com os do microcosmo. Essa analogia entre macrocosmo e microcosmo, e em particular entre a Terra e o corpo humano, remonta a Platão e gozou da autoridade de conhecimento comum na Idade Média e na Renascença.[34]

Leonardo adotou-a sem hesitar como um dos princípios norteadores de sua ciência e discutiu-a inúmeras vezes.[35] Sempre que explorava as formas da natureza no macrocosmo, buscava similaridades de padrões e processos no corpo humano; portanto, era natural para ele comparar as “veias de água” da Terra com os vasos sanguíneos do corpo.

A moderna concepção sistêmica da vida corrobora plenamente o método de Leonardo de investigação de similaridades entre padrões e processos nos diferentes sistemas vivos; e também sua visão da Terra como ser vivo reapareceu na ciência de hoje com o nome de teoria de Gaia.[36] Entretanto, Leonardo encontrou dificuldade com suas

comparações entre a Terra viva e o corpo humano vivo, pois, indo além da similaridade de padrões, preceituou igualmente a similaridade de forças e estruturas materiais. Um dos conceitos mais importantes das modernas teorias dos sistemas e da complexidade é que, mesmo havendo similaridade nos padrões de relações entre os componentes e os processos de dois sistemas vivos distintos, os processos em si, bem como as forças e estruturas nele implícitas, às vezes são muito diferentes.[37] Leonardo levou a maior parte da sua vida para perceber isso, mas o fez sem dúvida nenhuma na velhice.

Uma vez que a quantidade total de água na Terra é finita, pensava Leonardo, a água levada até o mar pelos rios deve, de algum modo, retornar às suas fontes, "indo e vindo constantemente". E como concebia a água como um "humor" que alimenta a Terra tal qual o sangue alimenta o corpo humano, imaginou a existência de veias de água dentro do corpo da Terra viva correspondentes aos vasos sanguíneos dentro dos corpos dos animais e seres humanos:

> O corpo da Terra, como os corpos dos animais, é percorrido por uma rede de veias, todas articuladas e formadas para a nutrição e vivificação tanto da própria Terra quanto de suas criaturas. Originam-se das profundezas do mar, para onde, após muitas revoluções, têm de voltar seguindo o leito dos rios, criados na superfície pelo rompimento dessas veias.[38]

Essa era a visão tradicional dos filósofos, de Aristóteles ao Renascimento: dentro da Terra viva, existe um sistema de veias de água pelo qual esta circula como o sangue no corpo humano, até que as veias se rompam no alto das montanhas. Ali, ela brota sob a forma de fontes, é coletada

pelos rios e flui de volta para o mar. Leonardo percebia, é claro, que os rios são alimentados também pela água das chuvas e pela neve derretida. No entanto, por muitos anos, sustentou que suas fontes principais eram as veias internas da Terra. Embora se deparasse com inúmeras inconsistências lógicas, hesitou por muito tempo em renunciar à vigorosa analogia entre a circulação da água na Terra e a do sangue no corpo humano. “A água que brota do seio das montanhas”, escreveu no início dos seus 40 anos, “é o sangue que mantém essas montanhas vivas”.[39]

Mas a mente científica de Leonardo não se contentava com a bela descrição metafórica da água como “o sangue que mantém as montanhas vivas”. Ele precisava explicar como a água realmente sobe até as fontes de montanha pelos canais internos. Via com clareza que certas forças contrárias à ação da gravidade também entravam no jogo:

> A água que jorra no ar através das veias rompidas dos altos picos montanhosos é subitamente abandonada pelas forças que a levaram para lá e, quando escapa a essas forças, retoma livremente seu curso natural.[40]

Mas que forças são essas? Para encontrar a resposta, Leonardo empregou um método característico de todas as suas pesquisas. Para ele, entender um fenômeno significava sempre associá-lo a outros fenômenos graças a uma similaridade de padrões. Nesse caso, ele identificou dois fenômenos parecidos – como o sangue, no corpo humano, chega até a cabeça e como a seiva, na planta, sobe a partir das raízes – e concluiu que as mesmas forças atuavam nos três exemplos:

> A mesma causa que, em todos os tipos de corpos vivos, move os humores contra o curso natural da gravidade também propele a água pelas veias da

> Terra, onde está encerrada, distribuindo-a por pequenas passagens. Assim como o sangue sobe de baixo e espirra pelas veias rompidas da fronte, e a água sobe da parte inferior da vinha até as cepas cortadas, assim a água sobe das profundezas do mar até os píncaros das montanhas onde, encontrando as veias rompidas, escorre e volta para o mar lá embaixo.[41]

Tendo estabelecido essa similaridade de padrões, Leonardo procurou identificar suas forças comuns. Ao longo dos anos, foi investigando e rejeitando diversas explicações.[42] A princípio, julgou que a água era levada por dentro ao alto das montanhas pelo calor do sol e aventou que esse processo era o mesmo do sangue quando, aquecido, sobe à cabeça do homem:

> Se o sol esquenta a cabeça de um homem, o sangue aumenta de volume e sobe de tal maneira, juntamente com os outros humores, que, pressionando as veias, provoca muitas vezes dores de cabeça.[43]

"O calor do fogo e do sol, durante o dia", argumentava Leonardo, "tem o poder de extrair a umidade dos lugares baixos das montanhas e fazê-la subir do mesmo modo que faz subir as nuvens extraindo sua umidade do leito do mar".[44] Mais tarde, porém, encontrou duas razões pelas quais essa explicação talvez não fosse válida. Percebeu que, nos picos mais altos e mais próximos do sol escaldante, a água era fria e às vezes gelada. E que, com esse mecanismo, uma quantidade maior de água deveria ser extraída no verão, quando o sol é mais quente: ora, nessa época, os rios de montanha estão quase sempre em seu nível mais baixo.

Numa segunda hipótese, Leonardo sugeriu que a água poderia ser erguida pelo processo de destilação, provocado pelo calor interno da Terra. Sabia da presença de fogo no interior do planeta, graças à observação de fontes termais e

vulcões, e também fez experimentos com diversos tipos de aparelhos de destilação.[45] Talvez, aventou ele, os fogos internos da Terra fervam a água em cavernas especiais até ela subir como vapor para o teto, onde, “encontrando o frio, se transforma de novo rapidamente em líquido, como vemos nas retortas, cai e forma outra vez nascentes de rios”.[46] Também aqui Leonardo encontrou um obstáculo à sua explicação. Uma destilação em tão grande escala, reconheceu ele, manteria os tetos das cavernas do interior da Terra úmidos por causa do vapor ascendente – mas, segundo suas observações, os tetos das cavernas de montanha estavam sempre secos.

Uma terceira hipótese baseava-se no fato de a água subir no vácuo dentro de um espaço fechado. Leonardo conhecia bem esse fenômeno. Uma de suas primeiras invenções, quando ainda trabalhava na *bottega* de Verrocchio, fora um método de criar vácuo a fim de forçar a subida da água, por meio de fogo aceso dentro de um balde fechado.[47] Supôs então que os fogos internos talvez deixassem o ar rarefeito nas cavernas da Terra e esse ar permitiria a ascensão da água até o teto. Mas logo concluiu que isso também não poderia funcionar, pois ar adicional entraria na caverna pelas aberturas das fontes de montanha e interromperia a função de sifão do vácuo. Num fólio do Codex Leicester, Leonardo reuniu e resumiu os modelos de destilação e de sifão juntamente com seus contra-argumentos.[48] Ilustrou o debate com um desenho que mostrava a seção transversal de uma montanha com veias internas entre o mar e o topo, onde se ligavam a duas grandes cavernas. Logo abaixo, vemos claramente os

esboços dos dois processos de destilação e sifão (ver Fig. 1-1). Um fólio anexo contém numerosos desenhos de experimentos com sifões.[49]

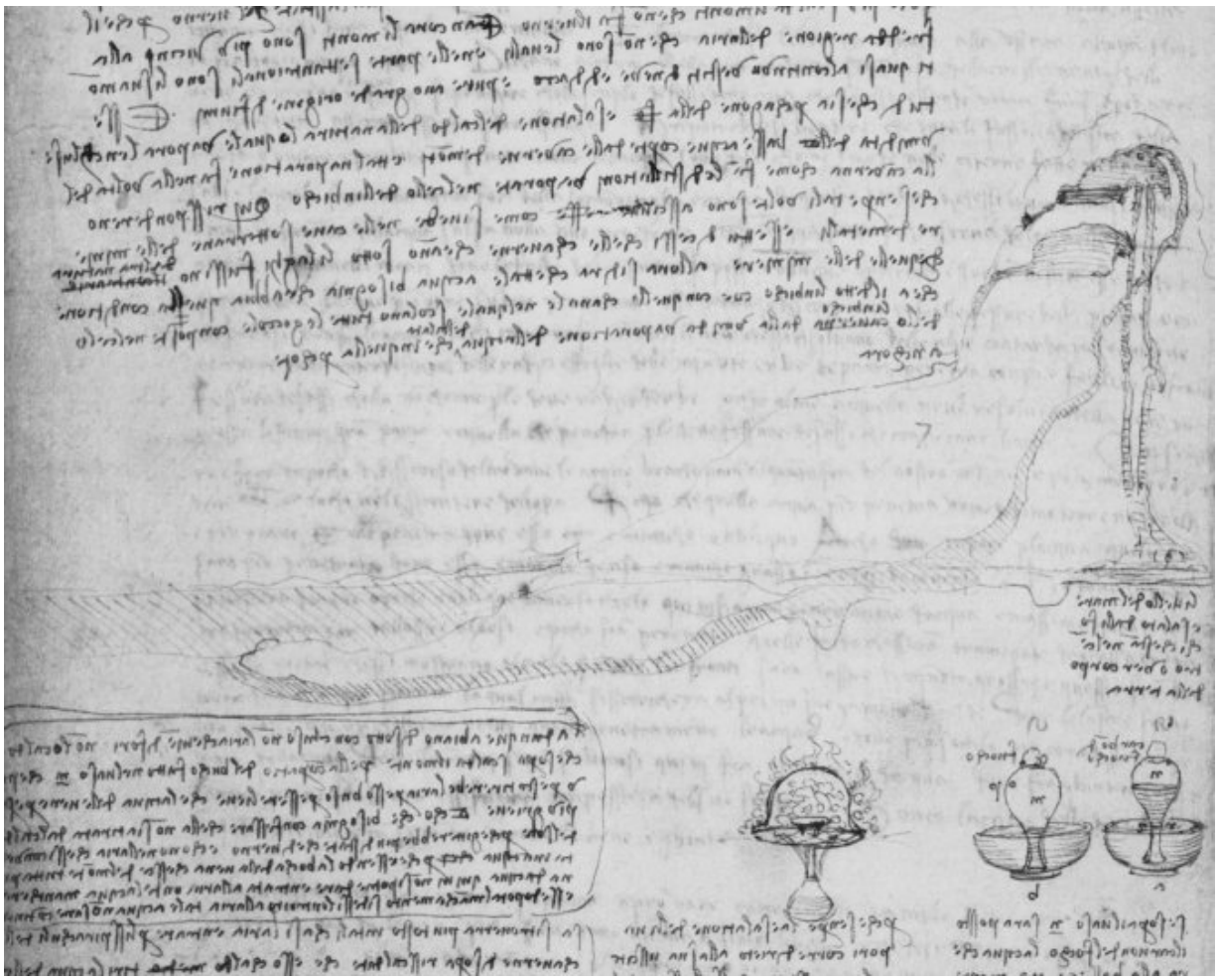


Figura 1-1: *Modelos de circulação da água por destilação e sifão, Codex Leicester, fólio 3v.*

Como mais uma alternativa, Leonardo propôs que a água talvez subisse por dentro das montanhas graças a um processo semelhante à ação de uma esponja, mas essa ideia um tanto vaga também não o satisfez. “Se dissermos que a ação da Terra é como a de uma esponja”, objetou, “a resposta será que, embora suba sozinha para o alto da esponja, a água não conseguirá fazer descer nenhuma de

suas partes, a menos que alguma coisa a esprema. No alto das montanhas, porém, vemos o oposto: ali, a água sempre flui por si mesma, sem que nada precise espremê-la".[50]

Depois de muitos anos examinando as mais diversas hipóteses e encontrando razões contrárias a todas, Leonardo finalmente concluiu que sua analogia entre os vasos sanguíneos do corpo humano e as veias de água da Terra era precária demais; que, no ciclo da água, esta não circula dentro das montanhas, mas sobe como vapor no ar, impelida pelo calor do sol, e depois cai como chuva nos picos. Num fólio da Coleção Windsor, escrito depois de 1510, quando estava com cerca de 60 anos, Leonardo declara inequivocamente que "a origem do mar é contrária à origem do sangue", pois os rios "são causados inteiramente pelos vapores aquosos que sobem no ar".[51]

Mais ou menos pela mesma época, em nota no Manuscrito G sobre a água como veículo de minerais, Leonardo afirma – um tanto de passagem, é verdade – que os rios são produzidos pelas nuvens:

> A salinidade do mar é devida às numerosas veias de água que, penetrando na terra, ali encontra depósitos de sal e, dissolvendo-os em parte, leva o sal para o oceano e outros mares de onde as nuvens, origem dos rios, nunca o retiram.[52]

Da perspectiva moderna, a longa luta intelectual de Leonardo para entender o ciclo da água é extremamente interessante. Suas sucessivas formulações teóricas lembram muito os modelos teóricos que caracterizam a ciência moderna.[53] Como os cientistas de hoje, ele testava continuamente seus modelos e estava sempre pronto a substituí-los quando achava que contradiziam alguma

evidência empírica. Além disso, à medida que avançava, tinha sempre em mente as analogias e padrões associados a fenômenos de outras áreas, revendo suas teorias a respeito desses fenômenos de acordo com as novas descobertas. Assim, quando modificava suas explicações sobre o ciclo da água, modificava também os modelos similares do funcionamento do coração e do fluxo do sangue no corpo humano.[54]

Por fim, Leonardo reconheceu que, embora a água e o sangue levem nutrientes para os sistemas vivos (como diríamos hoje) e se movimentem sem parar, os caminhos dos dois ciclos e as forças que os impulsionam são muito diferentes. Nos anos 1510-1515, quando ele finalmente chegou a uma compreensão clara do ciclo da água, chegou também à conclusão de que o sangue no corpo humano é movido pela ação de bombeamento do coração.[55] O fato de Leonardo ser capaz, na velhice, de abandonar a precária analogia entre circulação do sangue no corpo humano e circulação de água no corpo da Terra, firmemente estabelecida no pensamento filosófico medieval, é um testemunho impressionante de sua honestidade intelectual, de sua perseverança e da eficácia de seu método científico.

Quando, por volta dos 60 anos, compreendeu plenamente o ciclo da água e o movimento do sangue no corpo humano, Leonardo produziu também seus escritos mais sofisticados em botânica, nos quais descreveu o transporte da “seiva vital” pelos tecidos vasculares das plantas.[56] Seria fascinante descobrir como sua percepção da circulação da água e do sangue afetou suas ideias sobre como a água sobe pelos tecidos das plantas das raízes até o

topo. Hoje sabemos que isso é consequência da evaporação da água das folhas e de suas forças intermoleculares – a "coesão em si", como Leonardo a chamava.[57] Infelizmente, talvez jamais venhamos a conhecer quais foram os últimos pensamentos de Leonardo a respeito dessas matérias, pois o manuscrito que provavelmente continha seu tratado definitivo sobre botânica se perdeu.[58]

DA ENGENHARIA HIDRÁULICA AO ESTUDO CIENTÍFICO DO FLUXO

A grande maioria das exaustivas coleções de notas e desenhos de Leonardo sobre o fluxo da água ocupava-se de problemas de engenharia hidráulica e do fenômeno do fluxo em si. Na Renascença, este último era praticamente exclusivo de Leonardo. Se o movimento dos corpos rígidos vinha sendo estudado desde a Antiguidade, tendo os engenheiros hidráulicos produzido obras magníficas – dos enormes aquedutos e termas dos romanos às engenhosas eclusas do início do século XV –, a nenhum deles ocorreu perguntar-se como a água corrente poderia ser descrita matematicamente. Não tentaram também explorar as leis fundamentais do fluxo, tema de nossa moderna disciplina da dinâmica dos fluidos. Leonardo fez as duas coisas. Suas pesquisas, desenhos e ensaios de descrições matemáticas dos padrões de fluxo na água e no ar contam-se entre suas contribuições científicas mais originais, levando-o a descobertas que só reapareceriam séculos mais tarde.

Quando começou a trabalhar como pintor e "engenheiro ducal" na corte dos Sforza em Milão, em 1490, Leonardo já

passara oito anos na capital da Lombardia, então um dinâmico centro comercial de grande riqueza e importante sede de poder político no norte da Itália. Durante esses anos, não só pintou *A Virgem do Rochedo* e um retrato altamente original, *A Dama com Arminho*, da amante de Ludovico Sforza como encetou um vasto programa de autoaperfeiçoamento, estudando sistematicamente os principais ramos de conhecimento da época.[59]

Desde seus primeiros anos na Lombardia, Leonardo ficou fascinado pelo complexo sistema de canais da região e pelos problemas de engenharia que sua construção implicava. Durante os três séculos anteriores, a engenharia hidráulica alcançara no norte da Itália um grau de sofisticação considerável.[60] A riqueza da região lombarda dependia do controle da água e da drenagem de pântanos. A engenharia hidráulica era necessária para reduzir os danos das cheias periódicas dos rios alpinos, para suprir as cidades de água, para manter os portos funcionando, para a irrigação e para a navegação comercial. Os grandes canais da Lombardia, largos o suficiente para a passagem de duas barcaças, interligavam os principais rios da área e estavam dotados de uma série de eclusas sofisticadas para compensar as diferenças de níveis de água.

Engenheiro ducal na corte dos Sforza, Leonardo estava provavelmente encarregado de todos os trabalhos hidráulicos e, assim, familiarizou-se com as tecnologias existentes e os problemas que exigiam solução.[61] De fato, o Codex Leicester contém um vasto número de observações sobre questões hidráulicas práticas em rios e canais. Antes de Leonardo, esse conhecimento fora transmitido sobretudo

oralmente e a abordagem dos engenheiros lombardos era puramente empírica: todas as suas práticas e regras se baseavam no sucesso ou fracasso de obras anteriores similares. Isso não satisfazia a mente científica de Leonardo. Ele tinha de saber as razões por trás das regras empíricas e, assim, se dedicou a vida inteira ao estudo das leis dos fluxos, começando pela dinâmica básica das correntes dos rios e avançando para padrões complexos de fluxos turbulentos.

Mas, em meio aos estudos teóricos, Leonardo nunca perdeu de vista suas aplicações práticas. Por exemplo, durante uma discussão sobre o fluxo de água em torno de obstáculos submersos, anotou: “A ciência desses objetos é de grande utilidade, pois nos ensina a desviar rios e evitar a ruína dos lugares assolados por eles.”[62] E, no Manuscrito F, redigido na mesma época que o Codex Leicester, encontramos a seguinte advertência: “Quando detalhares a ciência dos movimentos da água, lembra-te de pôr sob cada proposição suas aplicações, para que essa ciência não seja inútil.”[63]

Na época de Leonardo, o estudo científico dos fenômenos do fluxo, hoje conhecido como dinâmica dos fluidos, era inteiramente novo. Na verdade, foi um campo de estudo que ele criou sozinho. Entretanto, dada a sua concepção dinâmica do mundo e sua prática de mostrar as formas da natureza, em desenhos e pinturas, em movimento e transformação perpétua, esse estudo deve ter parecido bastante natural para ele. Com efeito, o fluxo foi um dos temas dominantes em sua ciência e em sua arte. Nas palavras de Enzo Macagno, engenheiro hidráulico e

estudioso de Leonardo: “Para ele, tudo ou quase tudo fluía ou podia estar neste ou naquele estado de fluxo.”[64]

Na antiga filosofia grega, a ideia de que tudo no mundo está em constante processo de mudança foi resumida no famoso dito de Heráclito de Éfeso: “Tudo flui.” Não há nenhuma evidência de que Leonardo conhecia a filosofia de Heráclito; mas, num intrigante retrato duplo, o famoso arquiteto Bramante, amigo íntimo de Leonardo, representou-o como Heráclito e ele próprio como Demócrito.[65]

Por considerar o movimento e a transformação uma característica fundamental de todas as formas naturais, Leonardo presumiu que as propriedades básicas do fluxo eram as mesmas para todos os fluidos e confirmou isso com suas observações. Enfatizou, sobretudo, a semelhança entre os fluxos de água e ar. “Em todas as instâncias de movimento, nota-se grande conformidade entre água e ar”, escreveu no Manuscrito A;[66] e no Codex Atlanticus: “O movimento da água dentro da água é como o do ar dentro do ar.”[67] Todavia, Leonardo estava bem consciente de uma diferença: o ar é “infinitamente comprimível”, ao passo que a água é incomprimível.[68]

Em se tratando de fluxo de líquidos, Leonardo experimentou não apenas com água, mas também com sangue, vinho, azeite e até com grãos de areia e sementes.[69] Seus experimentos com materiais granulares são especialmente notáveis. Percebeu que podia aprender algo sobre o fluxo da água observando um fenômeno parecido, embora mais simples: o fluxo de grãos, em que as partículas fluidas individuais são visíveis. O emprego de

modelos simplificados para analisar os traços essenciais de fenômenos complexos é uma característica destacada de nosso moderno método científico.[70] O fato de Leonardo usá-lo repetidamente é sem dúvida curioso. Em sua visão do fluxo como um fenômeno universal dos gases, líquidos e materiais granulares, bem como em suas tentativas de usar estes últimos como modelo para os primeiros, Leonardo revelou um nível de abstração científica vários séculos à frente de seu tempo.

A MODERNA DINÂMICA DOS FLUIDOS

Na ciência contemporânea, o campo da dinâmica dos fluidos (também chamada de "mecânica dos fluidos", "hidrodinâmica" e "hidráulica"[71]) é sabidamente difícil por causa da aparência difusa dos fluxos turbulentos, que até hoje impediu uma análise matemática abrangente do fenômeno.[72] Numa frase sempre citada, o físico Richard Feynman, laureado com o Prêmio Nobel, classificou a turbulência de "o último problema insolúvel da física clássica".

Os fluxos turbulentos são compostos por redemoinhos, também conhecidos como vórtices, de diversos tamanhos, que se formam e se desfazem continuamente: são as porções rodopiantes e de movimentos aleatórios dos fluidos que tanto fascinaram Leonardo. O problema da dinâmica dos fluidos é que a turbulência não constitui a exceção e sim a regra. Em baixas velocidades, o atrito interno do fluido, ou viscosidade, impede que a turbulência ocorra; mas, à medida que a velocidade do fluxo aumenta, a

turbulência aparece, primeiro em pequena escala e depois se espalhando pelo fluido todo.

No século XIX, o engenheiro mecânico Osborne Reynolds descobriu que o início da turbulência pode ser caracterizado sob a ótica de um único parâmetro, hoje conhecido como número de Reynolds, que é proporcional à velocidade do fluxo, à viscosidade do fluido e às dimensões do objeto físico que contém o fluxo. Quando o número de Reynolds é baixo, o fluxo permanece estável, laminar; mas ao atingir um valor crítico, torna-se turbulento. Essa descoberta assinalou um grande avanço na dinâmica dos fluidos. Uma vez que diferentes valores do número de Reynolds correspondem a diferentes tipos de turbulência, esse parâmetro permite aos cientistas e engenheiros caracterizar perfeitamente os fluxos turbulentos.

A despeito desse avanço, porém, os cientistas até agora não conseguiram formular uma teoria abrangente da turbulência. As dificuldades matemáticas surgem do fato de as equações básicas do movimento que governam o fluxo, conhecidas como equações de Navier-Stokes, serem não lineares e notoriamente difíceis de resolver. Essa não linearidade é o equivalente matemático da natureza caótica da turbulência. Em todo fluxo turbulento, existe um grande número de variáveis inter-relacionadas. O valor de qualquer uma delas, num dado ponto, depende do fluxo em vários outros pontos, de sorte que as soluções precisam ser obtidas em inúmeros pontos ao mesmo tempo. Isso se torna ainda mais complicado pelo fato de os fluxos turbulentos apresentarem um amplo espectro de escalas. Um redemoinho pode ser mais de mil vezes maior que outro e

isso torna extremamente difícil sua descrição matemática simultânea.

O uso de computadores potentes para simular e analisar fluxos turbulentos facilitou, recentemente, a descoberta de algumas soluções das equações de Navier-Stokes para casos especiais. No entanto, mesmo com os novos conceitos e técnicas da teoria da complexidade, ou dinâmica não linear, cientistas e matemáticos obtiveram apenas sucesso limitado.[73] Eles conseguem simular o início da turbulência e alguns padrões de fluxo simples – por exemplo, fluxos lentos e bidimensionais em volta de um obstáculo –, mas os fluxos de grande turbulência continuam frustrando todos os esforços de análise abrangente.

Assim, a dinâmica dos fluidos consiste hoje de uma multiplicidade de teorias, cada qual válida apenas para casos especiais e baseada, invariavelmente, em alguma hipótese heurística construída a partir de observações experimentais.[74] Considerando-se a verdadeira colcha de retalhos que são essas teorias e as tremendas dificuldades enfrentadas hoje por engenheiros, físicos e matemáticos em suas tentativas de resolver os enigmas dos fluxos turbulentos, as realizações de Leonardo nesse campo são realmente admiráveis. Muito antes do desenvolvimento de sofisticadas técnicas matemáticas e do advento de computadores potentes, Leonardo conseguiu perceber muita coisa da natureza do fluxo.

As volumosas notas de Leonardo sobre os movimentos da água permaneceram ocultas por séculos após sua morte e, assim, não tiveram influência alguma no progresso da ciência e da engenharia. As primeiras análises teóricas dos

fluidos foram retomadas unicamente no século XVIII, quando o grande matemático Leonhard Euler aplicou as leis newtonianas do movimento a um fluido imaginário "perfeito" (isto é, sem viscosidade) e quando o físico e matemático Daniel Bernoulli descobriu algumas das relações energéticas básicas exibidas pelos líquidos. Ao contrário de Leonardo dois séculos antes, porém, os engenheiros hidráulicos da época não estavam interessados em teoria e os teóricos não comparavam seus modelos com observações do fluxo real dos fluidos.[75]

O progresso concreto na dinâmica dos fluidos teve de esperar até o século XIX, quando Claude-Louis Navier e George Stokes generalizaram as equações de Newton para a descrição do fluxo de fluidos viscosos e Reynolds descobriu o parâmetro que hoje traz seu nome. Só então os físicos e matemáticos redescobriram muitas das ideias teóricas sobre o movimento dos fluidos que Leonardo formulara claramente há mais de trezentos anos.

RIOS E MARÉS, ONDAS E FLUXOS

Em seus estudos de toda uma vida sobre os "movimentos da água", Leonardo observou os fluxos de rios e marés, desenhou belos e acurados mapas de bacias hidrográficas inteiras, investigou correntes em lagos e mares, fluxos em represas e cachoeiras, o movimento das ondas, fluxos através de tubos, bocais e orifícios. Uma análise ampla de todas as suas observações, desenhos e teorias encheria um livro – um livro que, na verdade, precisa ser escrito. Neste

capítulo, vou me concentrar nas discussões de Leonardo sobre as características principais do fluxo e da turbulência.

Leonardo tinha plena consciência da diferença entre fluxo e movimento de onda. Conforme expliquei até certo ponto em *A Ciência de Leonardo da Vinci*,[76] ele reconheceu, a partir de observações precisas de encrespamentos circulares num lago, que as partículas de água não se movem com a onda, apenas sobem e descem à medida que as ondas passam. O que é transportado junto com a onda é a perturbação que causa o fenômeno ondulatório – o *tremor*, como o chamava Leonardo – mas nenhuma partícula material. Para visualizar melhor os movimentos exatos das partículas de água, Leonardo atirava fragmentos de palha no lago e até comparou seu movimento à ondulação num campo de trigo:

> A onda se desloca do ponto de origem sem que a água mude de posição, tal como as ondulações que o sopro do vento provoca nos campos de trigo em maio, quando vemos as ondas correr pelo trigal sem que as próprias plantas mudem de lugar.[77]

A comparação entre ondas de água e ondulações num campo de trigo era bastante natural para Leonardo, pois ele via o movimento de onda como uma forma universal de propagação dos efeitos físicos nos quatro elementos – terra, água, ar e fogo (ou luz).[78] Além disso, ele pintou magistralmente os efeitos das “ondas de emoção” em vários quadros, o que se nota com bastante clareza no fluxo e refluxo de movimentos em sua obra mais grandiosa, *A Última Ceia*.[79]

Conforme assinalaram vários historiadores da arte, a dinâmica interna da pintura pode ser percebida como um

movimento de onda que emana da figura de Cristo, no centro, e se projeta para fora em ambas as direções, sendo refletido no final da mesa e na borda do afresco antes de retornar ao centro.[80] Alguns anos antes de pintar *A Última Ceia*, Leonardo observara cuidadosamente ondas interconectadas produzidas por seixos atirados à superfície tranquila de um lago.[81] Agora pintava um efeito similar na esfera das emoções humanas. As palavras de Cristo, “Um de vós me trairá”, são lançadas em meio ao silêncio solene do grupo reunido, onde geram poderosas ondas de emoção que se propagam e se interpenetram por todas as figuras da composição.

Durante suas repetidas viagens pela Itália central, Leonardo muitas vezes se detinha no litoral dos mares Adriático e Lígure.[82] Por ocasião dessas visitas, invariavelmente observava e analisava a natureza e o tipo das ondas, o choque da arrebentação contra a costa, a geração de neblina, os depósitos de resíduos nas praias, a subida e a descida das marés, o impacto das ondas contra os rochedos costeiros durante as tempestades marinhas e outros fenômenos associados ao movimento de onda. No entanto, a maior parte de seu trabalho com os movimentos da água era, de longe, devotada à natureza do fluxo.

Leonardo não apenas observava fluxos de água serenos e turbulentos, em rios, canais, diques e cachoeiras, mas também conduzia experimentos desse tipo sob condições controladas em laboratório. Por exemplo, enchia vasos de diferentes formas com água, agitava sua superfície com a mão e observava os efeitos. Num experimento simples, produziu um vórtice rotacional. “Quando gira em

movimentos circu lares num vaso com água pela metade", notou ele, "a mão produz um redemoinho artificial que expõe o fundo do vaso ao ar".[83] Usando o mesmo método, conseguiu criar também formas de turbulência mais complexas: "A mão, agitada repetidamente para a frente e para trás dentro do vaso, produz estranhos movimentos e superfícies de diferentes alturas."[84]

Numa série de experimentos mais sofisticados, Leonardo construiu canais especiais para observar os mínimos detalhes da água em movimento. Eis como descreve o equipamento:

> Faça-se um lado do canal de vidro e o resto de madeira; e jogue-se na água que ali escorre sementes de painço ou fragmentos de papiro, para se poder ver melhor o curso da água a partir de seus movimentos. Feito o experimento com esse material, encha-se o leito com areia misturada a pedrisco; aplaine-se o leito e agite-se a água para ver onde ela sobe e onde ela desce.[85]

Esses experimentos cuidadosos e detalhados são típicos do método empírico que Leonardo empregava em todas as suas pesquisas científicas. Em seus estudos do fluxo, ele desenhou e testou vários métodos experimentais que ainda são rotineiramente empregados nos laboratórios modernos cinco séculos depois. Os principais são suas técnicas de visualização do fluxo. Embora tivesse excepcionais poderes de observação, sem dúvida concluiu que era muito difícil perceber as linhas dos fluxos turbulentos. Relatou várias vezes que misturou sementes de painço e outros tipos de grãos à água para acompanhar melhor esses movimentos complexos:

> Este experimento deve ser feito com um vaso de vidro quadrado, mantendo os olhos mais ou menos no centro de uma das paredes; na água fervente,

> em movimentos lentos, despejem-se alguns grãos de painço, pois, graças ao movimento desses grãos, é possível perceber rapidamente o movimento da água que os conduz. Com base nesse experimento, podemos investigar muitos outros movimentos maravilhosos.[86]

A fim de analisar fluxos turbulentos em rios, Leonardo observou os movimentos das folhas ou pedaços de madeira e também usou serragem para tornar visíveis as linhas complexas desses fluxos:

> Se jogarmos serragem num regato, poderemos descobrir onde a água, revolvendo-se depois de bater nas margens, leva a serragem de volta para o centro da correnteza. Poderemos descobrir também as revoluções da água e onde outra água se junta a ela ou dela se separa, além de muitas outras coisas.[87]

Em outros experimentos, ele usou tinta para colorir uma de duas correntes unidas e assim determinar exatamente onde elas se misturavam. Esses métodos de visualização de fluxo foram redescobertos no século XIX e tornaram-se prática padronizada na moderna dinâmica dos fluidos para observar fluxos turbulentos.[88] Leonardo aplicou métodos similares para visualizar linhas de fluxo no ar, observando o movimento das nuvens, flocos de neve, fumaça, poeira, folhas e outras coisas arrebatadas pelas correntes de vento. “O ar se move como um rio”, explicou, “e leva as nuvens consigo como a água corrente leva tudo aquilo que nela flutua”.[89]

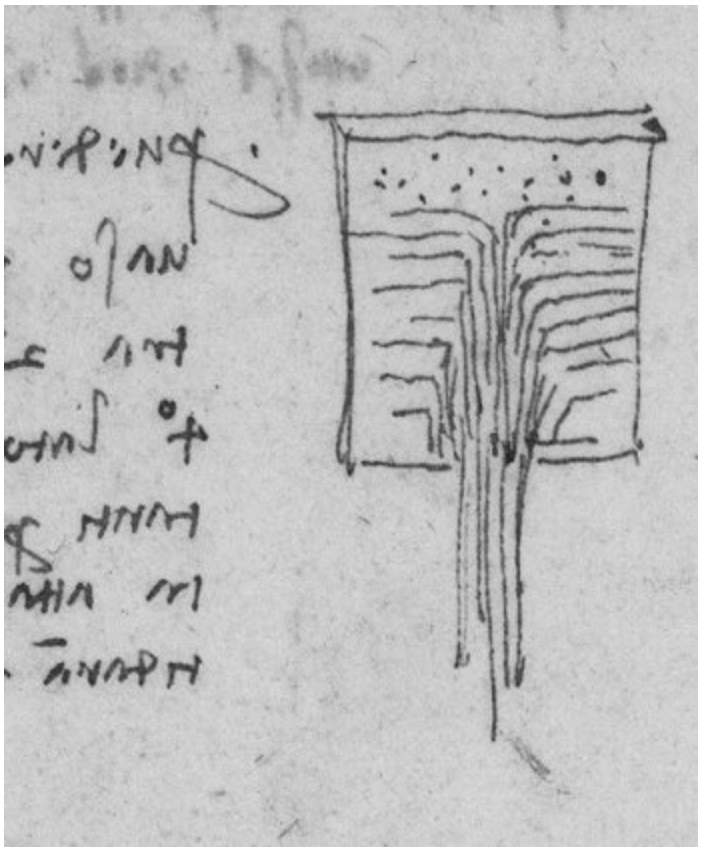


Figura 1-2: *Visualização de fluxo com sementes de painço, Codex Atlanticus, fólio 219r.*

Num fólio do Codex Atlanticus, encontramos uma descrição particularmente clara e simples da visualização de fluxo com sementes de painço (Fig. 1-2). Leonardo desenhou um recipiente de vidro com água e sementes de painço caindo sobre ela de cima, explicando que o objetivo do experimento era descobrir como, exatamente, a água escorria por um orifício central no fundo. Observa que as sementes flutuam a partir dos lados, como mostram as linhas traçadas no desenho. Em outro experimento semelhante, usa sementes pretas no centro e brancas nos lados para ver que parte da água passa primeiro pelo orifício.[90]

OS FUNDAMENTOS DO FLUXO

Depois de muitos anos estudando e analisando os movimentos da água, as agudas observações de Leonardo e seus experimentos metódicos deram-lhe a plena compreensão das principais características do fluxo. Reconheceu as duas principais forças que atuam no fluxo da água – a força da gravidade e o atrito interno, ou viscosidade, do fluido – e pôde assim descrever corretamente vários fenômenos gerados por sua junção. Notou também que a água é incomprimível e, embora assuma um número infinito de formas, seu volume nunca se altera. Além disso, reconheceu que a água muda suas propriedades quando materiais são suspensos ou dissolvidos nela e quando a temperatura se altera.

Num ramo da ciência que nem sequer existia antes dele, a visão arguta de Leonardo da natureza dos fluxos deve ser tida como uma realização das mais importantes. O fato de haver também esboçado algumas estruturas turbulentas erroneamente e imaginado fenômenos de fluxo que não ocorrem na realidade em nada diminui suas conquistas, especialmente se considerarmos que, mesmo hoje, cientistas e matemáticos encontram sérias dificuldades em suas tentativas de predizer e modelar os detalhes complexos dos fluxos turbulentos.

Leonardo foi o primeiro a estudar, metodicamente, a dinâmica do fluxo regular dos rios. Com essa finalidade, observava pedaços de cortiça descendo por um trecho reto de corrente a variadas distâncias da margem e contava “batidas de tempo” a fim de descobrir quanto os fragmentos demoravam para percorrer 100 *braccia*

(aproximadamente 65 m). Também construiu instrumentos de medição para calcular diferenças de nível e determinar “quanto um rio se inclina a cada milha”.[91] Além disso, usava boias especialmente desenhadas, suspensas a diversas profundidades em rios, a fim de determinar as velocidades relativas da água em diferentes níveis.[92]

A análise de Leonardo desses experimentos sistemáticos começa pelo reconhecimento de que o fluxo da água é provocado pela força da gravidade. “Não se pode descrever o processo do movimento da água sem antes definir o que é a gravidade”, sustenta ele,[93] e prossegue explicando a origem da gravidade de acordo com a teoria aristotélica dos quatro elementos.[94] Segundo essa visão, comumente aceita na Idade Média e na Renascença, os elementos, abandonados a si mesmos, dispõem-se em esferas concêntricas com a Terra no centro, rodeada sucessivamente pelas esferas da água, do ar e do fogo (ou luz). Entretanto, os quatro elementos nem sempre permanecem em seus devidos lugares, mas são constantemente perturbados e empurrados para as esferas vizinhas, de onde naturalmente procuram voltar às posições anteriores. É por isso que, segundo Aristóteles, a chuva cai através do ar, enquanto o ar sobe na água e as chamas, no ar.

A discussão de Leonardo da gravidade associada ao fluxo da água segue nitidamente a teoria de Aristóteles. Quando a água é retirada de sua esfera, explica ele, adquire peso e é atraída de volta pela gravidade, o que é verdadeiro para todos os elementos:

> Todos os elementos, embora sem peso em sua própria esfera, adquirem-no quando saem dela, ou seja, quando são projetados na direção do céu, mas não quando são atraídos para o centro da Terra.[95]

Por boa parte da vida, Leonardo admitiu o conceito aristotélico de gravidade como produto de tendências naturais, ou objetivos, inerentes à matéria em geral. Mas muitas vezes sentia dificuldade em explicar certos fenômenos de mecânica dentro do tradicional quadro teleológico[96] e, por volta dos 50 anos, organizando suas notas sobre a água no Codex Leicester, exprimiu algumas dúvidas quanto à visão aristotélica:

> A água do rio é atraída, empurrada ou move-se por si mesma. Se é atraída, ou antes, puxada, quem a puxa? Se é empurrada, quem a empurra? Se se move por si mesma, então é dotada de razão; ora, corpos que continuamente mudam de forma não podem possuir razão, pois neles não há a faculdade do juízo.[97]

Todavia, na velhice, Leonardo estava muito mais interessado nos padrões de crescimento e processos metabólicos das plantas, nos movimentos do corpo humano e no mistério da origem da vida do que em formular uma teoria de mecânica superior à concepção aristotélica. Nunca retomou suas dúvidas sobre a natureza da gravidade e mais duzentos anos se passaram até que a visão teleológica aristotélica das forças fosse substituída por um conceito radicalmente diferente na física de Galileu e Newton.[98]

Seja como for, para a análise do fluxo, a visão aristotélica da gravidade era suficiente no entender de Leonardo, pois não contradizia nenhuma de suas observações. Já, no final dos seus 40 anos, concebeu um experimento bastante engenhoso para medir a aceleração devida à gravidade, usando o mesmo plano inclinado que

Galileu usaria mais de cem anos depois.[99] Eis a conclusão de Leonardo: “Embora o movimento seja oblíquo, adquire em cada um de seus graus um aumento de aceleração e velocidade em progressão aritmética.”[100] Ou seja, afirmou que a velocidade de um corpo em queda livre é uma função linear do tempo.

Percebendo que, em casos de atrito negligenciável, uma bola em queda livre pelo ar ou rolando por um plano inclinado obedece à mesma lei matemática, Leonardo aplicou esse raciocínio ao fluxo dos rios. “Se os rios fossem retos e de igual largura, profundidade e inclinação”, argumentou, “descobriríamos que, a cada grau de aceleração, eles adquiririam graus iguais de velocidade”.[101]

Estava claro para Leonardo, no entanto, que a analogia entre uma bola rolando por um plano inclinado e a água do rio fluindo pelo declive do leito era uma idealização que não levava em conta os efeitos do atrito. Como engenheiro, atentava particularmente para o atrito em seus desenhos de máquinas e, na verdade, foi o primeiro a analisar sistematicamente as forças do atrito.[102] Portanto, conhecia bem o atrito interno dos fluidos, também chamada de viscosidade, e dedicou numerosas páginas dos cadernos de notas ao exame de seus efeitos no fluxo.

Nos modernos livros de física, a viscosidade é definida como o atrito interno, ou “espessura”, entre as moléculas de um fluido. Exceto pelo conceito de moléculas, foi exatamente assim que Leonardo a descreveu. “A água tem sempre coesão em si mesma”, escreveu no Codex Leicester, “coesão tanto maior quanto mais espessa ela for”.[103] A viscosidade do fluxo da água gera atrito entre o líquido e

seu recipiente sólido, mas também entre as camadas contíguas, que fluem a diferentes velocidades. Leonardo detectou sem dúvida os efeitos dessas forças de atrito, conhecidas na moderna dinâmica dos fluidos como tensão de cisalhamento. Em especial, ele reconheceu que o atrito entre um sólido e um líquido é bem maior que entre as diferentes camadas do fluido. “O fundo oferece mais resistência; por isso [a água] se move mais na superfície que no fundo”, anotou no Manuscrito H;[104] e, no Manuscrito I, observou que “os rios, quando retos, fluem com maior ímpeto no centro de sua largura do que nos lados”.[105]

A compreensão que Leonardo tinha da dinâmica do fluxo dos rios superava em muito a de seus contemporâneos. Até a segunda metade do século XVIII, acreditava-se comumente que a velocidade da água num rio aumentasse da superfície para o fundo. O decréscimo da velocidade do fluxo perto de paredes sólidas, como as das margens de um rio, que Leonardo descreveu clara e minuciosamente em vários cadernos de notas, só foi redescoberto no século XIX.[106]

A terceira característica fundamental do fluxo de fluido identificada por Leonardo (além dos efeitos da gravidade e da viscosidade) foi a conservação da massa. Ele notou que a massa de qualquer porção de água em fluxo sempre se preserva e que, como a água é incompressível, essa porção terá sempre o mesmo volume, não importa a forma que assuma. Leonardo ficou tão impressionado com essa conclusão que tentou desenvolver um tipo especial de geometria para descrever, com precisão matemática, as transformações e movimentos contínuos da água, cuja

massa e volume não variam.[107] Chamou a essa geometria das transformações “geometria feita com movimento” e trabalhou nela intensamente durante os últimos doze anos de sua vida. Hoje, vemos que as transformações matemáticas de Leonardo eram formas primitivas de topologia, um dos campos mais importantes da matemática moderna, desenvolvido plenamente por Henri Poincaré no início do século XX, uns quinhentos anos depois da morte de Leonardo.[108]

As investigações das transformações topológicas empreendidas por Leonardo jamais alcançaram um patamar em que pudessem ser usadas, na prática, como modelo para os fluxos de fluidos. No entanto, embora suas técnicas matemáticas não fossem sofisticadas o bastante para essa tarefa ambiciosa, parece que ele estava no caminho certo. Em lugar de suas transformações topológicas de formas geométricas visíveis, os físicos de hoje empregam o método matemático conhecido como cálculo tensorial para descrever transformações contínuas de volumes de fluidos infinitamente pequenos sob a influência da gravidade e da tensão de cisalhamento. Todavia, a conservação da massa, expressa na chamada equação da continuidade, é uma pedra angular da moderna teoria matemática, como o foi para Leonardo.

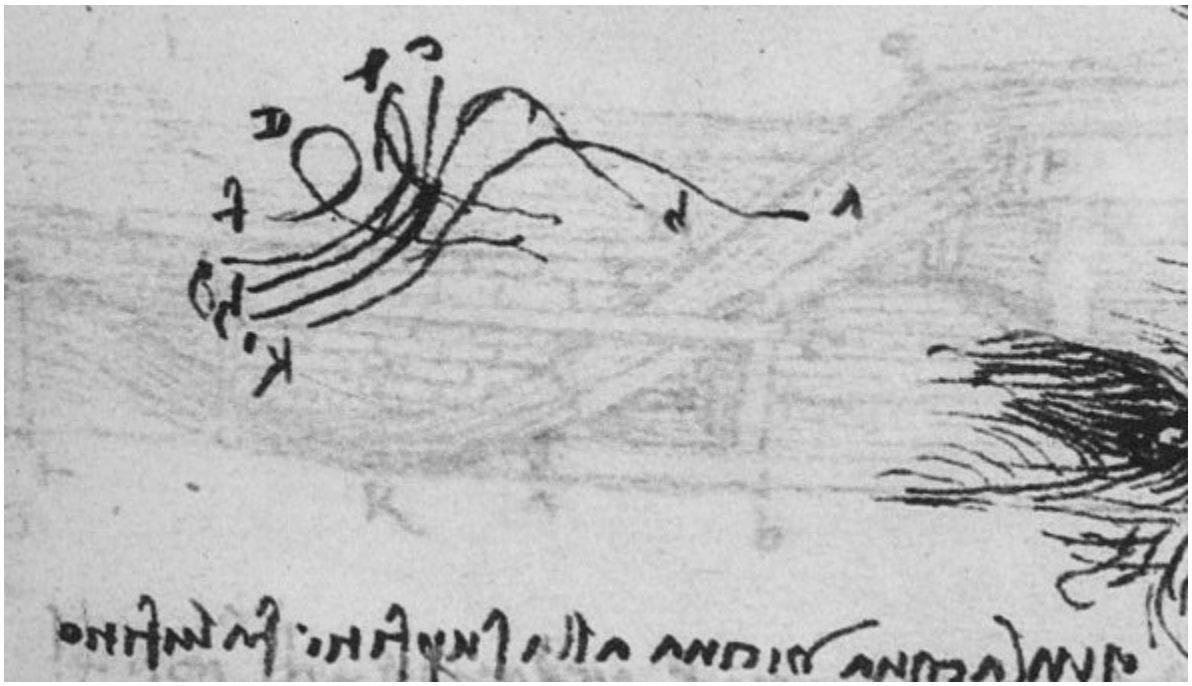


Figura 1-3: *Linhas de corrente de uma onda ao se quebrar, Ms. F, fólio 20r.*

Concluindo que a matemática de seu tempo não podia descrever os incessantes movimentos e transformações do fluxo da água, e que sua própria geometria das transformações era rudimentar demais para construir modelos de fenômenos de fluxo complexos, Leonardo adotou uma terceira opção. Em vez da matemática, recorreu à sua excepcional proficiência no desenho para documentar suas observações em quadros que podem ser impressionantemente belos e, ao mesmo tempo, desempenhar o papel de diagramas matemáticos. Seus numerosos esboços de padrões de fluxos turbulentos não são representações realistas de instantes isolados de observação, mas sínteses de muitas observações na forma de modelos teóricos. Vão de simples padrões ondulatórios, em que as linhas de corrente individuais são identificadas por letras (ver Figura 1-3), até combinações altamente

complexas de redemoinhos e bolhas, como no desenho da "água caindo sobre água" (Coleção Windsor, Figura 1-13).

MEDIÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA

No final do século XV, quando Leonardo era "engenheiro ducal" na corte dos Sforza em Milão, Itália, e tinha de supervisionar numerosos projetos de engenharia hidráulica como parte de suas funções,[109] a medição do fluxo da água constituía um importante problema técnico e administrativo. A agricultura, na florescente planície lombarda, dependia inteiramente de uma irrigação eficaz por meio da vasta rede regional de rios e canais. Além disso, todas as questões administrativas e jurídicas ligadas a direitos de uso da água, concessões e pagamentos exigiam medidas exatas de taxas de fluxo sob condições variadas.

Mas, coisa estranha, a unidade de medida para a taxa de fluxo (volume que flui através de uma dada secção transversal por unidade de tempo) comumente usada na Lombardia baseava-se numa conclusão errônea, que tornava quase impossível a distribuição justa e equitativa da água. Conhecida como *oncia milanese* ("onça milanesa"), essa medida estava em uso desde o século XII. Era definida como a quantidade de água descarregada por um orifício retangular de determinada dimensão (equivalente a mais ou menos 15 cm x 20 cm). Se hoje é evidente para nós que a taxa real de fluxo depende também da velocidade da água descarregada pelo orifício, que por sua vez depende do nível da superfície do líquido, essa taxa foi durante séculos

medida unicamente em termos das áreas de corte transversal, sem se levar em conta a velocidade.[110]

Já as discussões de Leonardo sobre a maneira de medir e calcular quantidades de fluxo exibem uma clareza conceitual realmente impressionante. Essa clareza deriva de sua profunda compreensão das características fundamentais do fluxo dos fluidos e de seus consideráveis poderes de visualização. Ele notou que a taxa de fluxo por uma determinada seção transversal pode ser definida como o volume que flui através dessa área por unidade de tempo; assim, dado que a velocidade do fluxo é definida como a distância que a água percorre por unidade de tempo, a taxa de fluxo iguala o produto da área de seção transversal *vezes* a velocidade do fluxo. O fato de a taxa de fluxo ser proporcional não apenas à área, mas também à velocidade do fluxo está claramente estabelecido em vários cadernos de notas. No Manuscrito F, por exemplo, Leonardo escreve:

> A quantidade de onças de água liberada por um orifício será maior ou menor conforme maior ou menor for a velocidade da água. Dobrar a velocidade dobrará a quantidade ao mesmo tempo; triplicar a velocidade triplicará a quantidade ao mesmo tempo, e assim ao infinito.[111]

Na verdade, Leonardo não foi o primeiro a compreender o conceito de taxa de fluxo. O engenheiro grego Heron de Alexandria já fizera isso no século I d.C. Em sua *Dioptra*, livro sobre agrimensura, Heron discutiu a medição do fluxo de água das fontes e, nesse contexto, definiu corretamente a taxa de fluxo, estabelecendo ainda a relação exata entre taxa de fluxo, área e velocidade. Contudo, o trabalho de Heron foi subsequentemente esquecido e assim

permaneceu por quase 1500 anos, até que Leonardo redescobrisse suas premissas no fim do século XV.

Estudando o fluxo dos rios, ele concebeu acertadamente a taxa de fluxo como o volume que flui através de uma determinada seção transversal numa "batida de tempo"; e, como sabia que o volume se preserva em todos os fluxos, concluiu que, sob condições de fluxo regular, "o rio transporta em cada seção de seu comprimento a mesma quantidade de água ao mesmo tempo".[112] Isso implicava, conforme percebeu, que em fluxos regulares as áreas de seção transversal e as velocidades de fluxo são inversamente proporcionais:

> Um rio de profundidade uniforme terá um fluxo mais rápido na menor largura do que na maior, na medida em que a maior ultrapassar a menor.[113]

Essa é uma demonstração clara e sucinta de um importante princípio da dinâmica dos fluidos, conhecido atualmente como princípio de continuidade. Trata-se da expressão matemática do fato de que, num rio de fluxo regular, esse fluxo precisa acelerar-se nas passagens estreitas para acomodar a mesma quantidade de água. A fim de ilustrar a dinâmica do fluxo, Leonardo empregou a engenhosa analogia de um regimento marchando por uma rua de largura variada, mas mantendo sua formação compacta. Um esboço do Manuscrito A mostra esquematicamente uma rua com homens marchando por três seções com larguras que aumentam progressivamente à razão de 1 para 4 e para 8. Na legenda, Leonardo explica:

> Suponhamos que os homens encham essas avenidas com seus corpos sem interromper a marcha. Quando os que estão no lugar mais largo dão um passo (...), os que estão no de largura intermediária dão dois e os que estão

> no terceiro, com largura equivalente a um quarto da do segundo, dão oito – ao mesmo tempo. Encontraremos essa proporção em todos os movimentos ocorridos em lugares de largura variada.[114]

Ao representar o fluxo da água de um rio de seção transversal variada com a imagem de um regimento marchando por uma rua de larguras diferentes, Leonardo utilizou um modelo simplificado, ou aproximado, para analisar os traços essenciais do fenômeno que estudava. Em séculos posteriores, essa técnica se tornou um elemento central do moderno método científico.[115] Muitos avanços na ciência de hoje foram apresentados primeiro em termos desses modelos aproximados e só depois inseridos em teorias mais abrangentes e elaboradas. É verdadeiramente extraordinário que Leonardo tenha usado essa moderna abordagem científica já no século XV.

As formulações precisas de Leonardo da taxa de fluxo e do princípio de continuidade permaneceram inéditas até o século XIX, sem exercer, pelo que sei, nenhuma influência na engenharia hidráulica de sua época. As taxas de fluxo continuaram a ser medidas em termos da unidade precária da *oncia milanese* por mais trezentos anos; e o princípio de continuidade, embora conhecido dos engenheiros hidráulicos pelo menos qualitativamente, só foi formulado com exatidão, outra vez, por Benedetto Castelli, discípulo de Galileu, no século XVII. Assim, até o século XIX, Castelli e não Leonardo da Vinci foi considerado o fundador da escola italiana de hidráulica.[116]

O VÓRTICE DE ÁGUA

No centro das pesquisas de Leonardo sobre fluxos turbulentos está o vórtice de água ou redemoinho. Nos cadernos de notas, há incontáveis desenhos e esboços de redemoinhos e vórtices de todos os tipos e tamanhos.[117] Quase sempre muito bonitos, eles dão testemunho do persistente fascínio de Leonardo com a natureza mutável e ao mesmo tempo estável desse tipo básico de turbulência. Conforme já dissemos, o fascínio de Leonardo provavelmente nasceu da intuição profunda e correta de que a dinâmica dos vórtices, combinação de estabilidade e mudança, constitui uma característica de todas as formas vivas.[118]

Leonardo descreveu corretamente como os redemoinhos se formam quando a água em movimento encontra um obstáculo (por exemplo, uma poça). “A corrente de água procura manter seu curso conforme a força que o motivou”, escreveu ele no Manuscrito A, “e, quando encontra um obstáculo, completa a extensão do curso inicial com mo vimentos circulares e rodopiantes”.[119] No *verso* do mesmo fólio, Leonardo ilustrou esse processo com um esboço de água fluindo para um tanque (Fig. 1-4). A observação de que um fluxo circular continuará em seu curso até a energia se dissipar, tal como faria se avançasse em linha reta, é absolutamente exata. O desenho em si, porém, é parcialmente in correto, pois na verdade apenas um par de vórtices contrarrotacionais se forma.[120]

Leonardo foi o primeiro a estudar e compreender os mínimos movimentos dos vórtices de água, às vezes desenhando-os com exatidão mesmo em situações complexas: por exemplo, nas ondas que se formam atrás

dos barcos ou por causa de outros obstáculos em águas turbulentas. Distinguiu acertadamente os redemoinhos circulares planos, nos quais a água gira basicamente como um corpo compacto, dos vórtices espiralados, como os que se formam numa banheira e que apresentam um espaço vazio, ou funil, no centro.[121] “O movimento espiralado ou circular de qualquer líquido”, observou ele, “será tanto mais rápido quanto mais perto estiver de seu centro de rotação. Esse fato é digno de nota porque o movimento circular de uma roda será tanto mais lento quanto mais perto estiver do centro do objeto giratório”.[122]

Figura 1-4: *Formação de vórtices contrarrotacionais por água fluindo para um tanque, Ms. A, fólio 60r.*

Na verdade, os redemoinhos circulares não são perfeitamente planos, mas levemente côncavos no centro. À medida que a velocidade de giro aumenta, essa concavidade se torna mais pronunciada e o redemoinho circular se transforma em vórtice espiralado. Leonardo

observou, acertadamente, que o espaço vazio no centro desse vórtice se aprofunda na razão direta da velocidade de giro:

> O redemoinho com cavidade mais profunda é o produzido pela água com movimento mais rápido; e esse redemoinho terá uma cavidade menor se for produzido em água mais profunda, com movimento mais lento.[123]

Com base nessas observações, Leonardo identificou três tipos de redemoinhos: planos, com centro elevado (por exemplo, no caso das turbulências de ar) e com centro côncavo (por exemplo, os que se formam nas banheiras). Descreveu os três tipos como “de fundo nivelado”, “de fundo compacto” e “de fundo cavo”, respectivamente.[124] Seus estudos meticulosos dos vórtices em águas turbulentas e no ar só foram retomados depois de 350 anos, quando o físico Hermann von Helmholtz elaborou uma análise matemática desse fenômeno em meados do século XIX.

Por muitos anos, Leonardo observou redemoinhos e vórtices em correntes de rios e lagos, atrás de pilares e quebra-mares, em confluências de rios, na base de cachoeiras, atrás de objetos de várias formas submersos em água corrente e em tanques de laboratório. Esforçou-se para classificar os diferentes tipos de vórtices de acordo com suas formas – com sua topologia, diríamos hoje. Fez longas listas desses tipos de turbulência. Eis aqui um exemplo característico, do Manuscrito F:

> Dos redemoinhos superficiais e dos que se formam em diferentes profundidades da água; dos que são constituídos pela totalidade da profundidade, dos que se movem e dos estáveis; dos compridos e dos redondos; dos que mudam seu

movimento periodicamente e dos que se dividem; dos que se misturam com outros; e dos formados por água que cai e volta, a qual ele faz girar.

Que tipo de redemoinho movimenta objetos leves em sua superfície sem submergi-los? Que tipo os submerge, fazendo-os girar no fundo e depositando-os ali? Que tipo os puxa do fundo para a superfície? Quais deles são côncavos, planos e com centro elevado?

Se isso parece confuso, convém lembrar que mesmo hoje, quinhentos anos depois de Leonardo, ainda não há nenhum esquema de classificação comumente aceito para os diversos tipos de redemoinhos. Ugo Piomelli, especialista em dinâmica dos fluidos, ironiza: "Se você consultar duzentos estudiosos da turbulência, obterá entre 190 e duzentas respostas diferentes. E, o que é mais interessante, ouvirá de dez a vinte definições contraditórias do que seja um redemoinho."[125] Em outras palavras, os esquemas de classificação aparentemente confusos de Leonardo refletem, sobretudo, a enorme complexidade dinâmica desses vórtices em perpétua mudança.

FLUXOS TURBULENTOS

Examinando, página por página, os desenhos e descrições que Leonardo elaborou dos fluxos turbulentos, ficamos espantados ao constatar quantos traços sutis e complexos de turbulência, confirmados pela moderna dinâmica dos fluidos, ele conseguiu identificar. Já vimos, por exemplo, que os fluxos turbulentos exibem muitas vezes um amplo espectro de escalas, com redemoinhos de diferentes tamanhos se formando um após outro.[126] Leonardo estava bem ciente desse fato:

> As grandes revoluções de redemoinhos são raras nas correntes dos rios, mas as pequenas são por assim dizer incontáveis; objetos grandes só são girados pelos redemoinhos grandes, nunca pelos pequenos, ao passo que objetos de menor tamanho podem ser girados tanto pelos redemoinhos grandes quanto pelos pequenos.[127]

Leonardo reconhece aqui não apenas uma gama completa de redemoinhos de diferentes tamanhos, mas também um alcance correspondente de impulsos angulares, ilustrados por objetos de tamanhos diversos movimentados pelos redemoinhos.[128] Tendo em vista o fato de que conceitos claros de energia e impulso só foram desenvolvidos no século XVII, a acuidade de Leonardo é verdadeiramente notável.

Figura 1-5: *Estudo de turbulência gerada por um jato de água caindo num poço, c. 1509-1511, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 44.*

A Coleção Windsor tem dois belos desenhos de um jato de água caindo num poço (Figs. 1-5 e 1-13). Na Figura 1-5, Leonardo mostra a formação de um amplo espectro de estruturas turbulentas de tamanhos variados. A área de

turbulência é dividida em duas partes: um regime “congelado”, que mostra diferentes tipos de vórtices estáveis, e outro, delineado com traços mais leves de giz, em que a energia cinética turbulenta vai descendo por vórtices sucessivos de escala cada vez menor até se dissipar na viscosidade da água. (O pequeno esboço acima do desenho principal resume o movimento básico da água que cai e volta, enquanto o da esquerda é um lembrete visual da conexão entre ondas circulares e frentes de onda.)

Figura 1-6: *Padrões de fluxo em torno de objetos submersos, c.1493-1494, Ms. H, fólio 64r.*

O desenho todo é um diagrama minucioso da compreensão que Leonardo tinha da turbulência produzida pelo jato de água, compreensão considerada correta, em seus aspectos essenciais, pelas modernas concepções de fluxo. Seu traço mais notável é a descida da energia por vórtices de escalas decrescentes até a dissipação total: a isso a moderna dinâmica dos fluidos dá o nome de "cascata de Richardson", que Leonardo antecipou qualitativamente quinhentos anos antes de sua formulação pelo físico Lewis Richardson.[129]

Bom número dos estudos que Leonardo fez da turbulência diz respeito ao que é conhecido na moderna dinâmica dos fluidos como "rotação de corpo rígido" (fluxo de água em volta de objetos submersos). No pequeno caderno classificado como Manuscrito H, por exemplo, que Leonardo levava consigo durante suas observações de água corrente na natureza, encontramos uma série de esboços de rotações de corpo rígido (em volta de objetos de formas variadas – ver Fig. 1-6). Como em muitos outros desenhos similares, Leonardo, aqui, mostra com precisão que o padrão de fluxo está ligado ao objeto posto contra a corrente, mas gera vórtices separados (conhecidos como "derramamentos de vórtices") depois que a água ultrapassa esse objeto.

Figura 1-7: *Fluxo de corpo rígido em torno de uma coluna, Codex Leicester, fólio 22r.*

Quando examinamos esses esboços, devemos ter em mente que eles não são imagens realistas, instantâneas, de linhas de fluxo verdadeiras. Talvez Leonardo haja observado uma série de padrões de fluxo flutuantes, visualizando-os com a ajuda de sementes de painço, identificando certos tipos de turbulência e depois registrando suas observações em diagramas sumários. Assim, os esboços que vemos nos cadernos de notas são superposições de estruturas instantâneas observadas, as quais resultam em desenhos de padrões de fluxo médios. São os modelos conceituais que Leonardo elaborou dos fluxos turbulentos.

Por exemplo, os pares de vórtices nos dois esboços do alto da Figura 1-6 não apareceriam simultaneamente, mas alternadamente, como fluxos flutuantes e em rápida mudança. O que os esboços mostram é a média dos padrões de fluxo. A mesma técnica vem sendo usada por cientistas contemporâneos, auxiliados por sofisticada fotografia de lapso de tempo. Séculos antes, Leonardo teve de recorrer a métodos simples de visualização de fluxo e a seus agudos poderes de observação para chegar a resultados notavelmente parecidos.

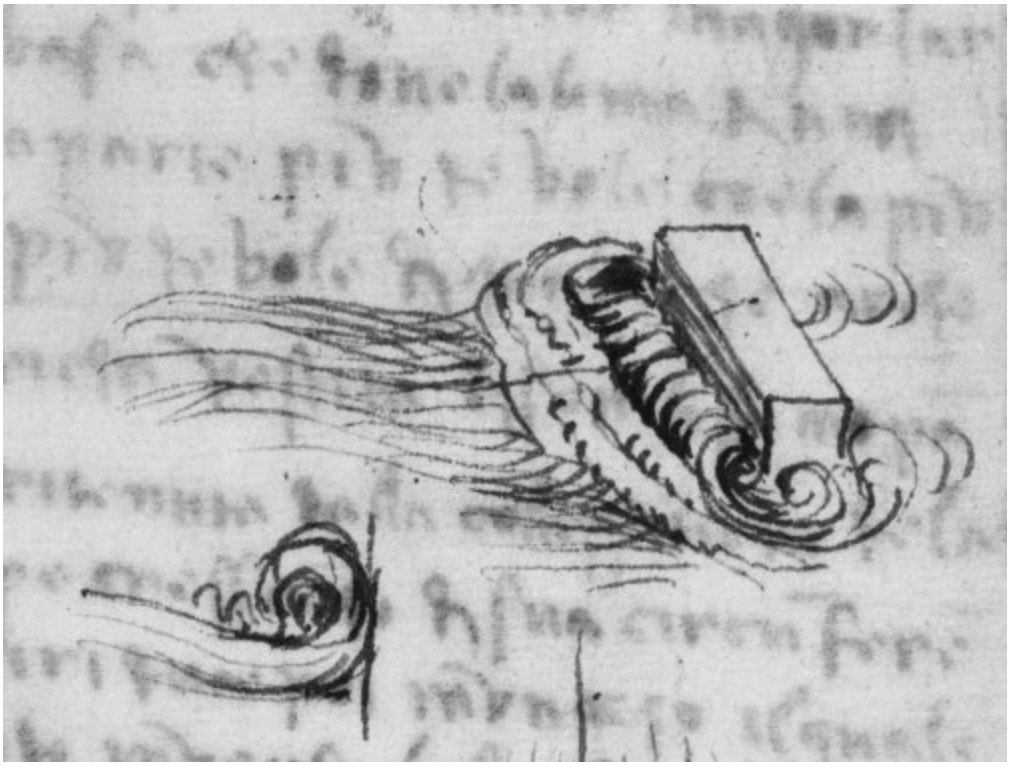


Figura 1-8: *Vórtice ferradura, Codex Leicester, fólio 25v.*

O Codex Leicester traz vários esboços de fluxos de corpo rígido, claramente dispostos na margem direita do texto. A Figura 1-7, por exemplo, mostra a água contornando uma coluna. De novo, Leonardo fez um

desenho simétrico para registrar o padrão de fluxo médio. O fluxo real consistiria de vórtices flutuantes em camadas. Do mesmo modo, os pares de vórtices contrarrotacionais da Figura 1-4 devem ser interpretados como médias simétricas do verdadeiro padrão de fluxo.

Em outro desenho notável, também do Codex Leicester, Leonardo esboça corretamente o hoje chamado vórtice ferradura, em torno de um obstáculo prismático (ver Fig. 1-8). As formas básicas da cabeça e das hastes da ferradura são mostradas claramente. No entanto, o sentido da rotação da cabeça está incorreto: deveria ser horário, não anti-horário conforme Leonardo o desenhou (como a água na superfície flui mais rapidamente que no fundo, a camada superior desceria e subiria de novo quando o fluxo encontrasse um obstáculo).

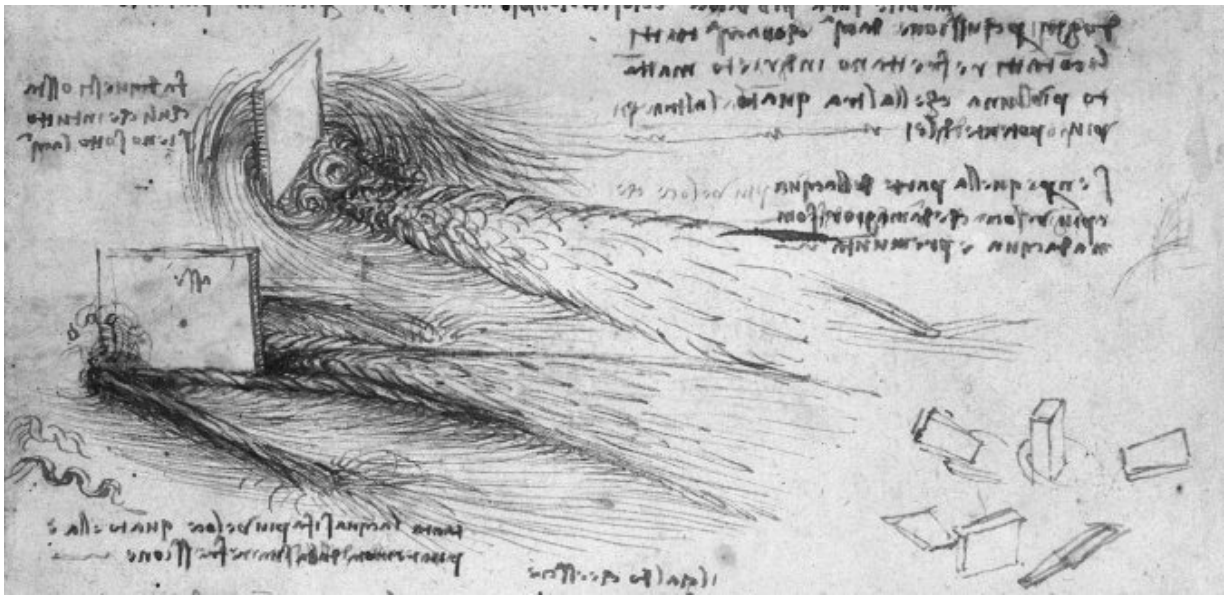


Figura 1-9: *Esteiras turbulentas atrás de uma prancha retangular, c. 1509-11, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 42v.*

Além dos esboços relativamente simples do Codex Leicester, Leonardo fez diversos desenhos minuciosos de padrões de turbulência altamente complexos, produzidos pela colocação, na água, de obstáculos variados. A Figura 1-9, da Coleção Windsor, mostra fluxos turbulentos ao redor de uma prancha retangular disposta em dois ângulos diferentes. (Variações adicionais são sugeridas nos pequenos esboços à direita da imagem principal.) O desenho de cima exibe claramente um par de vórtices contrarrotacionais (flutuando no próprio fluxo) à testa de uma corrente de esteira aleatória. Os detalhes essenciais desse padrão complexo de turbulência são bastante acurados – um impressionante testemunho dos poderes de observação e da lucidez conceitual de Leonardo.

Figura 1-10: *Esteiras turbulentas e fios de cabelo ondulado, c. 1510-13, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 48r.*

Como já vimos, as origens da moderna dinâmica dos fluidos remontam ao século XIX, quando Osborne Reynolds identificou um parâmetro que permitiu a cientistas e engenheiros caracterizar perfeitamente os diversos tipos de turbulência.[130] Reynolds descobriu ainda que a descrição matemática dos fluxos turbulentos pode ser decomposta em fluxo principal (variável com o tempo) e parte flutuante. Leonardo reconheceu também a diferença entre esses dois

componentes dos fluxos turbulentos, embora apenas de maneira qualitativa. Numa página famosa da Coleção Windsor, ele comparou o fluxo de água turbulento ao crescimento do cabelo ondulado. Desenhou três esteiras turbulentas, atrás de obstáculos retangulares, perto do esboço de uma mecha de cabelos crespos: esteiras e cabelos parecem idênticos (ver Fig. 1-10). Na legenda, anotou: “Observe-se o movimento da superfície da água, que lembra o do cabelo. Este tem dois movimentos, um provocado por seu próprio peso, o outro pela direção das ondas.” E prosseguiu:

> Assim, a água tem seus movimentos rodopiantes, uma parte dos quais se deve ao ímpeto do fluxo principal, a outra ao movimento incidente e refletido.[131]

Com essa afirmação, Leonardo antecipou, em termos qualitativos, o que é hoje conhecido por “decomposição de turbulência de Reynolds”, quase quatrocentos anos antes de Osborne Reynolds formulá-la matematicamente.[132]

Em todas as suas observações de fluxos turbulentos, Leonardo reconheceu com a maior clareza que, a despeito de mudanças e flutuações incessantes, a turbulência também produz, surpreendentemente, formas estáveis. Com isso, antecipou outro conceito importante da moderna dinâmica dos fluidos, onde essas formas organizadas de turbulência – redemoinhos e vórtices em todas as escalas – são co nhecidas como “estruturas coerentes”. Leonardo desenhou-as inúmeras vezes e mencionou sua estabilidade em diversos cadernos de notas. No Manuscrito I, por exemplo, encontramos a seguinte observação, muito precisa:

> Os redemoinhos, com diversos movimentos rodopiantes, continuam até esgotar seu ímpeto inicial. Não permanecem nas mesmas posições, mas, depois que são produzidos e começam a girar, assumem graças ao ímpeto da água uma forma única, descrevendo a partir daí dois movimentos: um dentro de si mesmos, por sua própria revolução; o outro, ao seguir o curso da água que os arrasta.[133]

Como muitas outras observações argutas de Leonardo sobre a turbulência, essa também é amparada pelas modernas concepções de fluxo.

ÁGUA CAINDO SOBRE ÁGUA

Um tipo de padrões turbulentos que Leonardo achava especialmente intrigante é o causado por um jato de água caindo numa poça tranquila. Os Manuscritos A, F e I, bem como os desenhos da Coleção Windsor, contêm vários estudos de cachoeiras e jatos em contato com água parada. Em muitos deles, os jatos entram na área acima da poça por um orifício retangular – e esse é um traço “industrial” que lembra os frequentes trabalhos de Leonardo com diques e canais.

Em alguns desses estudos, ele desenha estruturas turbulentas de um tipo especial, chamadas de “ondas saca-rolhas” pelos historiadores da arte (ver Fig. 1-11). Essas estruturas helicoidais realmente ocorrem em determinados tipos de turbulência. Em minha opinião, porém, não vemos nos esboços de Leonardo registros de observações concretas e sim um modelo teórico que ele usa para explicar os vórtices gerados em cachoeiras. Com efeito, no Codex Atlanticus, há o desenho esmerado de uma corda torcida primeiro em hélice e depois em hélice dupla (ver Fig. 1-12), que evoca imediatamente os vórtices helicoidais dos

esboços de quedas-d’água. Isso sugere que Leonardo usou a corda como modelo para seus vórtices em forma de “rosca”.

Figura 1-11: *Cachoeira e “ondas saca-rolhas”, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 45r.*

Figura 1-12: *Corda torcida em hélice e hélice dupla, Codex Atlanticus, fólio 520r.*

Os estudos mais minuciosos de Leonardo sobre água caindo numa poça são os dois desenhos da Coleção Windsor já mencionados.[134] O famoso “água caindo sobre água”, em particular, é uma síntese impressionante de numerosos estudos prévios que integra vários tipos de turbulência num belo quadro compacto (Fig. 1-13). Obviamente, não se trata de um flagrante realista de um jato de água caindo numa poça, mas de um diagrama detalhado da análise que Leonardo fez do conjunto complexo de turbulências causadas pelo jato.

A legenda começa pela afirmação de que existem aí quatro tipos de turbulência:

> Os movimentos da água depois de cair na poça são de três espécies, às quais se deve acrescentar uma quarta, a do ar que submerge juntamente com a água.[135]

Leonardo prossegue com uma descrição pormenorizada desses movimentos, que ocupa vários parágrafos e é um tanto confusa. Os quatro movimentos por ele identificados parecem ser: o da água e do ar capturado caindo verticalmente na poça, o retorno da água e das bolhas de ar à superfície, o rompimento das bolhas de ar e sua água caindo de novo na poça, e o movimento espiralado da água na superfície, sob a forma de grandes redemoinhos.

A análise de Leonardo é um misto de observações perspicazes e conclusões errôneas. Ele nota corretamente que o ar é puxado para dentro da água (processo hoje conhecido como “arrastamento”) e que as bolhas de água sobem à superfície, onde se desfazem em aglomerados de gotículas. No entanto, engana-se ao presumir que, após a explosão das bolhas, sua água não apenas volta para a

superfície, mas também penetra a poça até o fundo. No desenho, essa estranha conclusão é ilustrada por uma série de redemoinhos ovais, que se projetam para baixo. Enfim, o quarto tipo de turbulência – os grandes redemoinhos gerados na periferia em volta do impacto do jato – é também a ilustração de uma observação correta. As modernas concepções de fluxo mostram, com efeito, que os redemoinhos vão se tornando cada vez maiores à medida que se afastam da zona de impacto.

Figura 1-13: *"Água caindo sobre água", c. 1508-1509, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 42r.*

O aspecto mais notável do estudo que Leonardo fez desse padrão complexo de turbulência é o contraste gritante entre sua análise visual e sua análise escrita. Se esta é tortuosa e canhestra, aquela é compacta e elegante. Ambas são parcialmente incorretas, mas o ponto principal, a meu ver, é que Leonardo conseguiu resumir uma situação caótica num desenho simples, capaz de servir como diagrama matemático conciso. É exatamente isso que fazem atualmente os teóricos do caos. Põem ordem na confusão recorrendo a linhas e formas visuais, embora num espaço matemático abstrato.[136]

TURBULÊNCIA NA ÁGUA E NO AR

Leonardo, conforme já vimos, estudou não apenas o fluxo de água, mas também os fluxos de sangue, vinho, azeite e mesmo grãos de vários tipos. Reconheceu que as propriedades básicas do fluxo são as mesmas para todos os fluidos e enfatizou, em especial, as similaridades entre os fluxos de água e ar.[137]

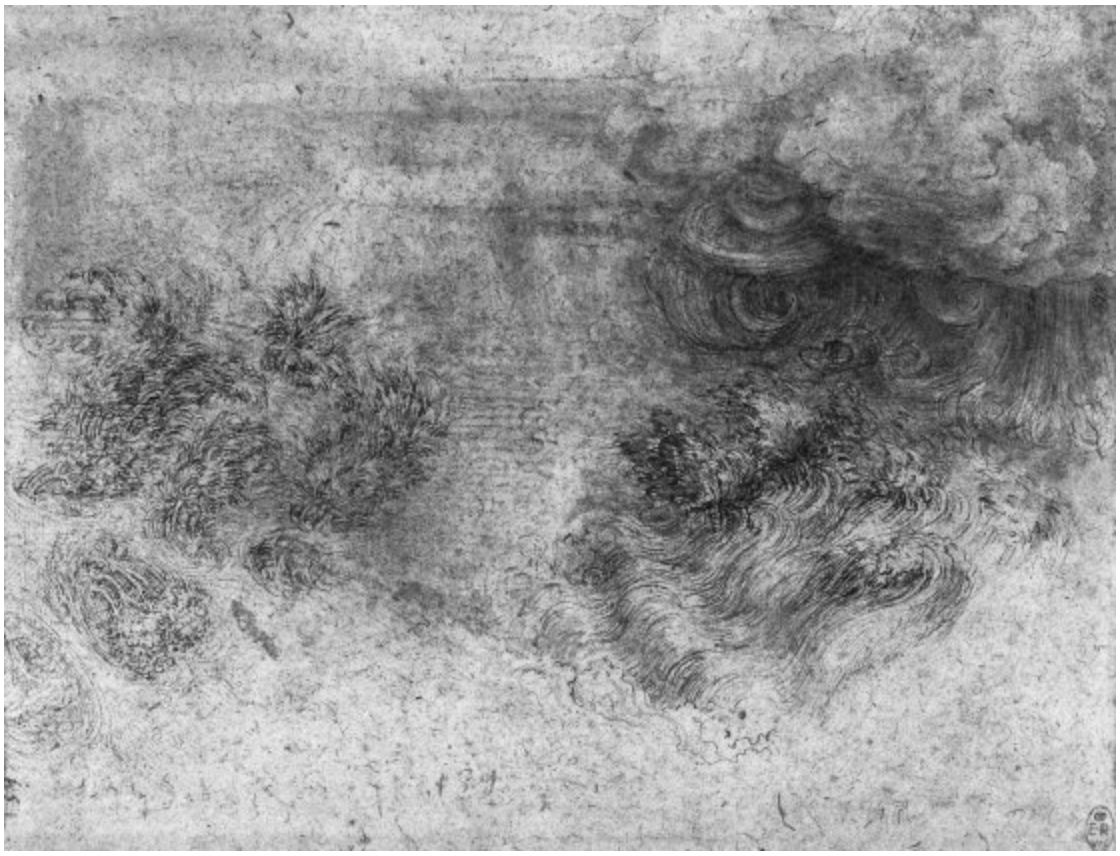


Figura 1-14: *O começo do dilúvio, c. 1514, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 57.*

As correntes e turbulências do ar interessavam-no muito, pois entendê-las era crucial para o cultivo de uma de suas maiores paixões: a ciência do voo e o desenho de máquinas voadoras.[138] “Para chegar a uma verdadeira ciência do movimento dos pássaros no ar”, declarou ele, “é necessário chegar antes à ciência dos ventos”. A fim de desenvolver uma ciência dos ventos, Leonardo observou e analisou os movimentos giratórios do ar tão meticulosa e persistentemente quanto estudou as turbulências dos fluxos de água.[139]

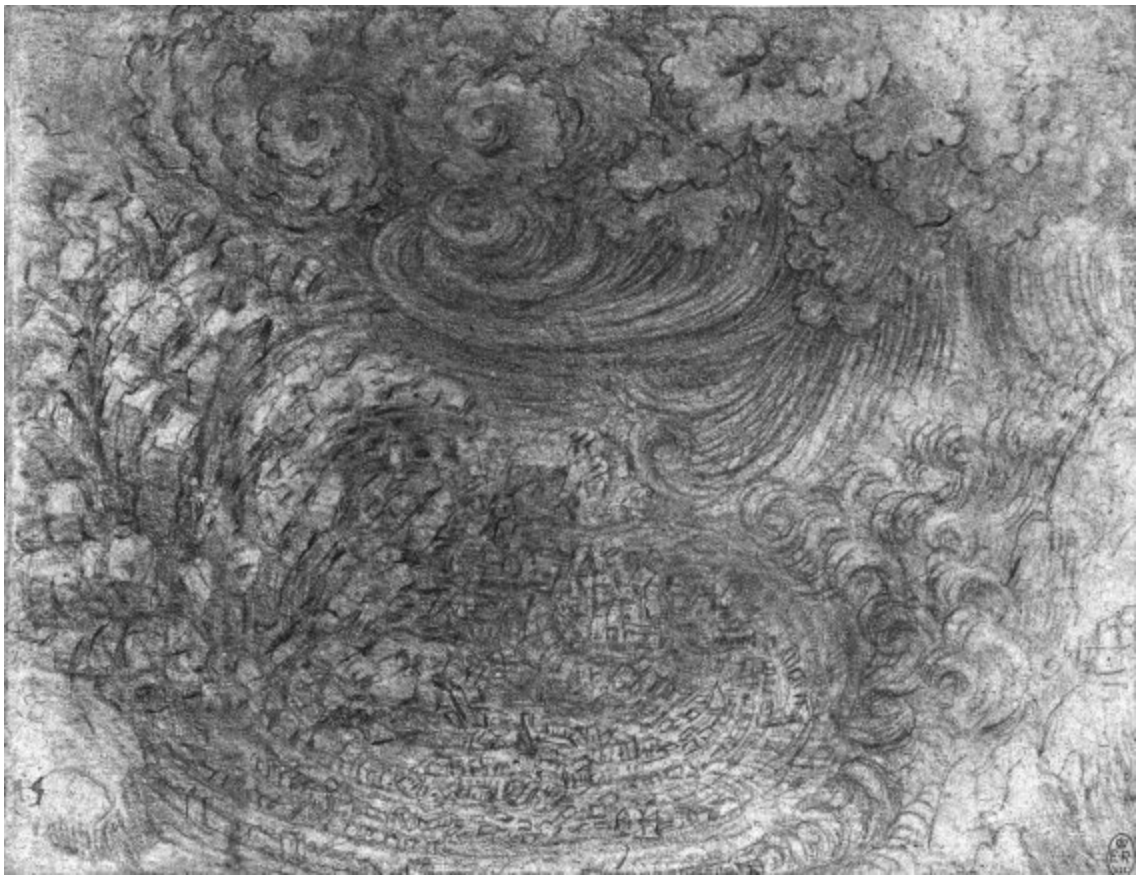


Figura 1-15: *Ciclone arrasando uma cidade, c. 1514, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 62.*

Além disso, observou com atenção turbulências em misturas de água e ar. Ao longo da vida, sentiu-se fascinado pelas catástrofes naturais, fazendo inúmeros desenhos de inundações e tempestades cheios de redemoinhos de ar misturados com chuva, pedaços de árvores arrancadas, areia e pedras.[140] Esses estudos culminaram numa série de doze desenhos extraordinários a carvão, conhecidos como “desenhos do dilúvio” e hoje na Coleção Windsor, acompanhados por vigorosas narrativas de visões apocalípticas. Leonardo criou-os em Roma, aos 63 anos de idade, quando estava sozinho, deprimido e assaltado por pensamentos mórbidos.[141]

Os desenhos do dilúvio são violentos e inquietantes. Mostram árvores sendo arrancadas do chão e feitas em pedaços, rochas desabando sob a chuva torrencial, casas e cidades inteiras ruindo ao peso de tempestades furiosas. A atmosfera é sombria e lúgubre. Mal se distingue a paisagem. Não se veem vítimas humanas, tornadas irrelevantes pela magnitude do desastre. A impressão geral é de desespero, fragilidade humana e futilidade em face das forças cataclísmicas da natureza.

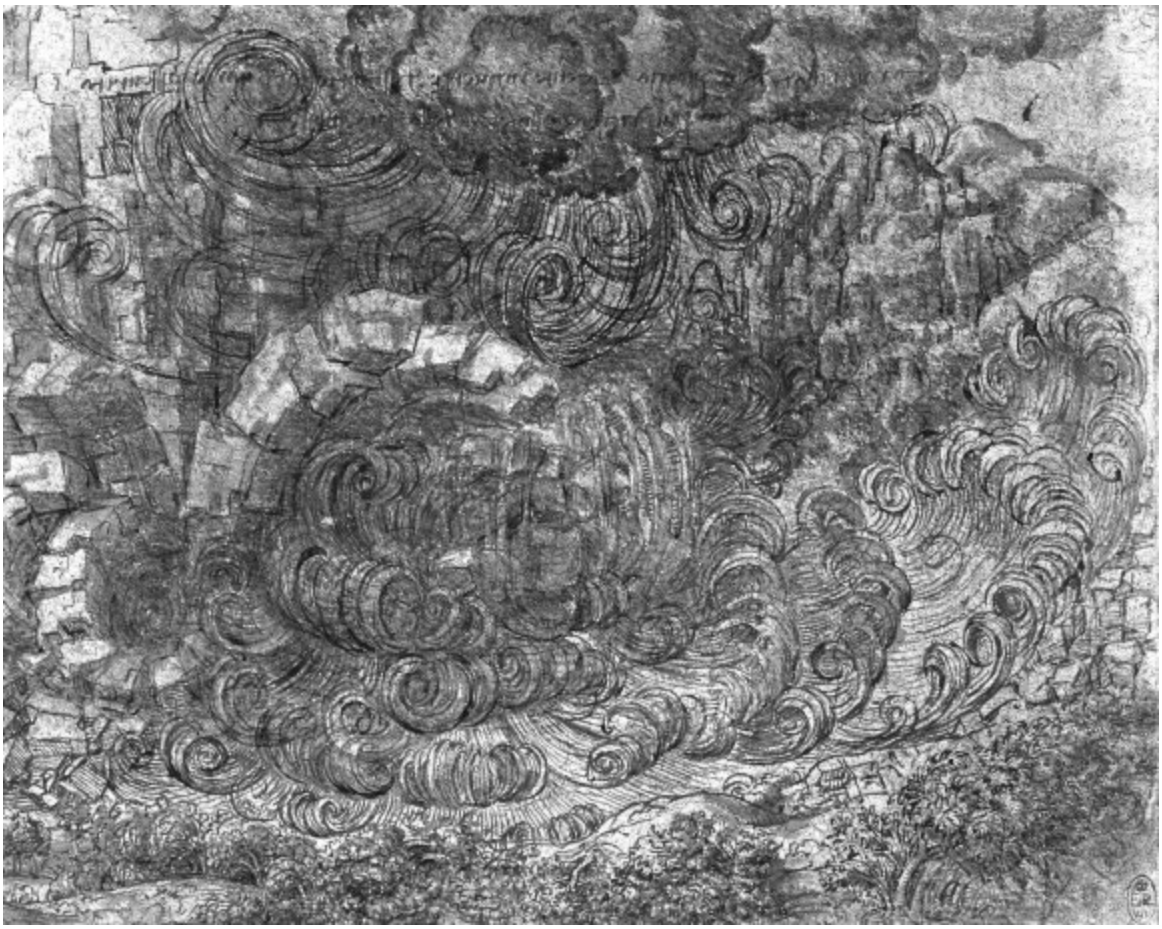


Figura 1-16: *Estudo formalizado de dilúvio, c. 1514, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 59.*

O primeiro desenho da série (Fig. 1-14) mostra o começo do dilúvio. No canto superior direito, nuvens se

juntam ameaçadoramente e os primeiros vórtices de ar saturado de chuva aparecem. Na paisagem embaixo, árvores são curvadas até o chão e a água de um lago se encrespa em ondas revoltas sob o ímpeto da tempestade. Em outro desenho (Fig. 1-15), vemos o dilúvio em toda a sua força. O céu está tomado por vórtices assustadores; desaba uma chuva torrencial; uma cidade é assolada pelo ciclone; pedras rodopiam no ar, sob a ação de formidáveis redemoinhos.

A Figura 1-16 mostra os mesmos vórtices violentos de água, ar e fragmentos de pedras, mas aqui Leonardo "formalizou" sua representação do cataclismo a tal ponto que o impacto emocional diminui e o desenho lembra mais um diagrama matemático. No texto que o acompanha, também as passagens altamente emocionais são entremeadas por observações frias e analíticas, com descrições precisas de cascatas e correntes, além de instruções detalhadas sobre a maneira de pintar efeitos ópticos gerados por nuvens tempestuosas e pancadas de chuva.

Esses desenhos são exemplos maravilhosos da síntese de arte e ciência feita por Leonardo. Ele os elaborou de cabeça, já idoso, não para apresentar resultados de observações ou experimentos, mas para descrever uma situação mítica – o grande dilúvio, a turbulência absoluta. Os desenhos encerram uma contundente mensagem emocional e, ao mesmo tempo, são bastante exatos em sua reprodução de cascatas e correntes tanto na água quanto no ar.

Examinando o conjunto completo dos desenhos, podemos reconhecer muitas das formas que Leonardo explorou em suas incansáveis observações de fluxos turbulentos. Há redemoinhos bidimensionais (por exemplo, no canto superior esquerdo da Fig. 1-16); espirais tridimensionais (alto da Fig. 1-15), vórtices arredondados (parte superior da Fig. 1-14); pares de redemoinhos contrarrotacionais (parte superior da Fig. 1-16) e "ondas saca-rolhas" geradas pelo impacto da chuva no chão (lado direito da Fig. 1-16). Um vórtice arquetípico, idealizado, aparece repetidamente em diversas escalas e de diferentes perspectivas. Em conjunto, os desenhos de dilúvio nada mais são que um catálogo visual de cascatas e vórtices, o resumo final feito por Leonardo de seu conhecimento da turbulência.

A FORMA ESPIRAL

Na maioria dos desenhos de dilúvio, bem como no estudo da "água caindo sobre água" (Fig. 1-13), Leonardo esboçou grandes redemoinhos com pequenas espirais nas extremidades. Essas formas não estão corretas. Na realidade, as turbulências seriam circulares ou elípticas, mas as diferenças podem ser muito sutis e difíceis de detectar sem técnicas experimentais sofisticadas.

Acredito que Leonardo gostava de desenhar esses redemoinhos com espirais nas extremidades porque via a espiral como uma forma arquetípica do fluxo turbulento e, de um modo mais geral, como um símbolo da vida. Aventei antes que ele, intuitivamente, reconhecia a dinâmica do

vórtice espiralado – estável, mas em constante mudança – como típica de todas as formas vivas[142] e penso que isso também pode ser dito da forma espiral em geral. Em suas observações abrangentes das formas naturais, Leonardo não deixaria de notar os padrões de crescimento em espiral das conchas marinhas e de certas plantas. Prestava atenção especial ao modo como folhas e galhos se espiralam em torno de um eixo central em diversas espécies de árvores e arbustos, tendo reproduzido esses padrões de crescimento com perfeita exatidão botânica.[143] Às vezes, desenhava também formas exageradas de folhagens em espiral, a mais famosa das quais é a "Estrela de Belém" (Gravura 2), que apresenta notória semelhança com um vórtice de água.

O fascínio de Leonardo pelos movimentos espiralados pode ser visto ainda em muitas de suas pinturas, sobretudo os retratos. Graças a seu uso frequente de configurações de corpo espiraladas (por exemplo, no *São João Batista* e no *Leda*), Leonardo criou a figura em serpentina, amplamente usada por Michelangelo e que se tornaria uma das formas fundamentais da elegância na Alta Renascença. Segundo o historiador da arte Daniel Arasse: "Leonardo empregou a forma em serpentina para dar vida e movimento às suas figuras, inventando assim a 'graciosidade' clássica de representação."[144]

Para Leonardo, a espiral era o código arquetípico da natureza mutável, mas estável, das formas vivas. Ele a via nos padrões de crescimento de plantas e animais, em cachos de cabelos ondulados, em movimentos e gestos humanos – mas, acima de tudo, em vórtices rodopiantes de água e ar. O movimento da água é o grande tema unificador

de sua ciência das formas vivas. A água é o elemento vivificador que flui pelas veias da Terra e pelos vasos sanguíneos do corpo humano. Ela nutre e sustenta todos os corpos vivos. Suas formas, como as destes, são fluidas e estão em perpétua mudança. A água é uma fonte transbordante de energia que, por milhões e milhões de anos, moldou a superfície da Terra viva, transformando aos poucos rochas áridas em solo fértil. Com sua infinita variedade de formas e movimentos – rios e marés, nuvens e chuva, cascatas e correntes, vórtices e redemoinhos –, a água flui pela arte de Leonardo e interliga os principais campos de sua ciência.

* Ver Apêndice C.

CAPÍTULO 2

A Terra viva

Leonardo via a água como o principal agente na formação da superfície terrestre. Desde o começo da juventude, era fascinado pelos picos montanhosos que a água escavava e por fim transformava em cascalho ou solo fértil. Menino ainda, saía a explorar formações rochosas, cachoeiras e cavernas no interior toscano em volta de Vinci. Mais tarde, esses se tornaram os elementos característicos de sua paisagem mítica pessoal: as fantásticas formações de rochas que apareceriam constantemente nos fundos sombrios de suas pinturas.

A aguda percepção de Leonardo da contínua interação da água e das rochas motivou-o a empreender estudos aprofundados de geologia. Durante suas viagens pela Itália central e setentrional, como engenheiro militar e hidráulico, ele analisou a erosão das rochas, os depósitos de cascalho e areia, e os estratos de sedimentação, produzindo vários mapas detalhados das regiões que visitava. As observações geológicas de Leonardo, como as que fez em todos os outros ramos de sua ciência, mostram uma exatidão impressionante. Baseando-se nessas análises extensas e metódicas, ele formulou uma série de princípios geológicos

com uma clareza que só seria igualada no século XX – princípios ensinados ainda hoje em nossos cursos de geologia.[1]

OSSOS, CARNE E SANGUE DA TERRA

As exposições geológicas de Leonardo, especialmente suas ideias sobre a formação da Terra, parecem muito modernas porque ele, ao contrário de seus contemporâneos, tinha plena consciência da longa duração do tempo geológico e, como os geólogos modernos, via a Terra como uma entidade dinâmica e em constante transformação. A base filosófica dessa concepção era a ideia – fundamental em sua ciência – de que a Terra como um todo está viva e de que os padrões e processos no microcosmo (o corpo humano) são semelhantes aos existentes no macrocosmo (o corpo da Terra viva).

Como em muitas de suas investigações científicas, Leonardo começa por resumir essa antiga doutrina. O resumo mais antigo está no Manuscrito A, escrito por volta de 1490-92, durante seu primeiro perío do em Milão:

> O homem era considerado pelos antigos um “mundo menor” e, certamente, o termo lhe convinha; pois, sendo ele composto de terra, água, ar e fogo, seu corpo se parecia com o da Terra. Se o homem tem dentro de si ossos para sustentação e arcabouço da carne, o mundo tem rochas para suporte da terra. Assim como o homem possui em si o reservatório de sangue no qual os pulmões se dilatam e se contraem, assim o corpo da Terra tem suas marés oceânicas, que também aumentam e diminuem a cada seis horas ao ritmo da respiração do mundo. Do dito reservatório de sangue saem as veias que se ramificam pelo corpo humano, do mesmo modo que o oceano penetra o corpo da Terra com infinitas veias de água.[2]

Depois desse resumo das concepções dos antigos, Leonardo se apressa a dizer que existe também uma importante diferença entre o corpo da Terra e o corpo humano: a Terra não possui tendões. Mas sustenta que ela não precisa deles porque (de acordo com a cosmologia aristotélica) não se move:

> No corpo da Terra, faltam os tendões. E faltam porque são feitos para o movimento. Ora, como o mundo é perpetuamente estável, não executa movimento algum e assim os tendões são desnecessários. Porém, em tudo o mais, [o homem e a Terra] são muito semelhantes.[3]

Dezoito anos depois Leonardo retoma, de modo mais consistente, a ideia de uma Terra viva. Se antes sua analogia entre corpo humano e corpo da Terra se baseava na noção aristotélica de que ambos são compostos pelos quatro elementos, agora ele vai além do nível da simples comparação. Justifica a ideia da Terra viva observando que os processos de crescimento e renovação, comuns a todas as formas de vida, também estão presentes nela:

> As penas crescem nas aves e mudam todos os anos; os pelos crescem nos animais e mudam todos os anos, exceto em algumas áreas, como a juba dos leões, os bigodes dos gatos e outras do mesmo tipo. A relva cresce nos campos, as folhas crescem nas árvores e anualmente se renovam em grande parte.[4]

Leonardo conclui, dessas observações, que a Terra deve ser dotada de uma força vital ou alma,[5] a qual engendra formas e processos similares aos do corpo humano:

> Podemos, pois, dizer que a Terra possui uma força vital de crescimento e que sua carne é o solo; seus ossos são os estratos sucessivos de rochas que formam as montanhas; sua cartilagem é a pedra porosa; seu sangue é a rede de veias de água. O lago de sangue em volta do coração é o oceano. Sua respiração é o aumento e a diminuição do sangue nos pulsos, assim como, na Terra, é a subida e a descida da maré.[6]

Conforme já vimos, Leonardo abandonou nos últimos anos a analogia entre os vasos sanguíneos do corpo humano e as veias de água da Terra, por lhe parecer muito limitada. Percebeu que os caminhos do ciclo da água no macrocosmo e os do ciclo do sangue no microcosmo, bem como as forças que os impulsionam, são muito diferentes.[7] Entretanto, jamais renunciou à concepção básica da Terra viva. Sempre que investigava as formas da natureza no macrocosmo, procurava semelhanças de padrões e processos no corpo humano. Com isso, deixou de lado as analogias gerais tão comuns em sua época para tecer paralelos entre observações acuradas nos dois reinos. Por exemplo, como discutirei em capítulos subsequentes, ele usava seu conhecimento dos fluxos de água turbulentos para entender os detalhes sutis do movimento do sangue no coração e na aorta.[8] Via a “seiva vital” das plantas como seu fluido nutritivo essencial e notou que ela nutre os tecidos vegetais do mesmo modo que o sangue nutre os tecidos do corpo humano.[9] Tomou essas observações como testemunhos inequívocos da unidade da vida em todas as escalas da natureza.

A concepção de Leonardo da Terra como um ser vivo, dotado de padrões e processos comuns a todos os sistemas orgânicos, é precursora da moderna teoria de Gaia, que vê nosso planeta como um sistema vivo, auto-organizado e autorregulado.[10] De fato, o criador da teoria contemporânea, o químico atmosférico James Lovelock, chegou a usar em um de seus livros analogias que lembram muito as de Leonardo, exceto pelo fato de comparar a Terra a uma sequoia gigante e não ao corpo humano.[11]

A visão que Leonardo tinha das rochas, do solo e da água como ossos, carne e sangue da Terra viva foi a base filosófica e talvez mesmo espiritual de seu duradouro fascínio pelas intrigantes formações rochosas moldadas pela ação da água. Ele não só analisou, em seus escritos científicos, o modo pelo qual o corpo da Terra se transforma continuamente graças à interação da erosão e da sedimentação como registrou esses processos em muitos de seus desenhos e pinturas, sempre de maneira correta e convincente. “Nenhum artista, antes ou depois”, escreve o historiador da arte Martin Kemp: “conseguiu igualar a magia sugestiva com a qual [Leonardo] plasmou em desenhos e pinturas sua visão da unidade interna e externa das formas criadas.”[12]

Toda a ciência de Leonardo é absolutamente dinâmica. Ele pinta as formas da natureza em movimento e transformação incessantes, reconhecendo que as formas vivas estão sendo continuamente moldadas e modificadas por processos ocultos. Essa concepção dinâmica da natureza aparece em seus estudos de anatomia, botânica e dinâmica dos fluidos, mas é talvez mais evidente nos de geologia. Segundo Leonardo, a Terra, como corpo vivo, é constantemente moldada e modificada em longos períodos de tempo. Por isso, seus conceitos geológicos nos parecem tão modernos.

No capítulo introdutório de um manual de geologia publicado em 1995, encontramos a seguinte passagem:

> A Terra é um planeta dinâmico que vem mudando continuamente durante seus 4,6 bilhões de anos de existência (...). Podemos visualizar facilmente o modo como montanhas e colinas são desgastadas pela erosão e como paisagens são modificadas pelas forças do vento, da água e do gelo.

> Erupções vulcânicas e terremotos denunciam um interior ativo; e rochas retorcidas e fraturadas indicam o tremendo poder das forças internas da Terra.[13]

Esse trecho, exceto por um ou outro termo moderno, não ficaria deslocado nos cadernos de notas de Leonardo.

A ÁGUA ESCULPE MONTANHAS E VALES

Como outros engenheiros hidráulicos da Renascença, Leonardo estava bastante familiarizado com a erosão das margens fluviais, especialmente durante os períodos de cheia dos rios alpinos na região lombarda.[14] Os cadernos de notas, sobretudo o Codex Leicester, contêm numerosas sugestões de como enfrentar esses problemas práticos. Mas, ao contrário de seus colegas engenheiros, Leonardo foi além das regras empíricas e integrou observações meticulosas numa teoria abrangente que explicava como a água, em longos períodos de tempo, esculpiu montanhas e vales na superfície da Terra.

Para começar, Leonardo afirma que a erosão resulta do atrito entre água e terra: “Os rios têm um fluxo turvo por causa da terra que sobe em resultado do atrito de suas águas contra o leito e as margens.”[15] Em seguida, descreve pormenorizadamente como o processo de erosão, ao longo do tempo, cria vales inteiros:

> Embora quase nivelados, muitos regatos se originam nas partes mais baixas da superfície e começam a escavar a terra, formando receptáculos para outras águas próximas. Desse modo, cada parte de seu curso vai se tornando mais larga e mais profunda pelo aumento constante das águas, até estas serem drenadas. As concavidades se tornam os cursos de torrentes que recebem água das chuvas e, assim, suas margens continuam a se desgastar até que os espaços entre elas se transformam em encostas íngremes.[16]

Com base nessas observações, Leonardo conclui que os vales são criados por águas correntes: “Todo vale foi escavado por seu rio, havendo entre os vales a mesma proporção que há entre os rios.”[17] Mais notável ainda, ele sustenta que essa afirmativa pode ser verificada correlacionando-se camadas de rochas dos dois lados de um vale. Explica que a ocorrência da mesma sucessão de estratos de rocha superpostos em ambas as vertentes é a prova mais clara de que os vales foram escavados nas montanhas pela água.

> Os rios cortaram e separaram uns dos outros os membros dos grandes Alpes; e isso se vê pela ordem das camadas de rocha: do cume até o rio, as de um lado correspondem às do outro.[18]

Com esse argumento, Leonardo estava duzentos anos à frente de seu tempo. A sobreposição de estratos rochosos foi reconhecida e pesquisada com a mesma profusão de detalhes durante a segunda metade do século XVII.[19]

Em seus cuidadosos estudos da erosão, Leonardo forneceu descrições detalhadas do transporte e depósito de fragmentos de rocha por rios e regatos. Em particular, ele observou que os rios depositam pedras grandes angulares nas montanhas altas e que os pedaços menores são progressivamente desgastados e arredondados à medida que descem rio abaixo; depois, como cascalho ou argila fina, se depositam na embocadura:

> O rio que flui das montanhas deposita grande quantidade de pedras grandes em seu leito de cascalho e essas pedras conservam alguns ângulos e faces; e, seguindo seu curso, arrasta pedras com ângulos mais desgastados, de sorte que as grandes vão ficando menores. Mais à frente, o rio vai depositando cascalho grosso e depois minúsculo, que por fim se transforma em areia a princípio grossa, depois fina, a qual, por sua vez, se

> transforma em barro grosso e depois tão fino que mais parece água: é a terra branca usada na fabricação de jarros.[20]

Hoje, essa sequência de processos – conhecidos como arredondamento, seleção e sedimentação – é aceita como um dos postulados básicos da geologia. “Aprendi essa regra”, lembra-se o biólogo evolucionista Stephen Jay Gould, “como o princípio número 1 no primeiro dia de aula de meu curso de geologia na universidade”.[21]

À semelhança dos geólogos modernos, Leonardo via a erosão, transformação e sedimentação dos fragmentos de rocha como um processo único, graças ao qual a água continuamente modela a superfície da Terra. “A água desgasta as montanhas e enche os vales”, escreveu no Codex Atlanticus. “Se pudesse, ela reduziria a Terra a uma esfera perfeita”.[22] Conduziu estudos detalhados das formas e dinâmica dos rios, do modo como seus leitos são escavados e cobertos de lodo, da formação e desenvolvimento dos meandros. Além disso, elaborou inúmeros mapas, bonitos e exatos, de bacias hidrográficas e lagos.

OS MAPAS DE LEONARDO

Mesmo o observador casual não pode deixar de reconhecer que os mapas geográficos de Leonardo são surpreendentemente modernos. Ele empregava técnicas cartográficas que superavam qualquer coisa tentada pelos cartógrafos medievais e renascentistas. Seus mapas muitas vezes mostram distâncias baseadas em cuidadosas leituras odométricas, obtidas graças a instrumentos engenhosos

construídos por ele mesmo;[23] as elevações são indicadas por traços de diferentes cores e matizes, como em nossos atlas modernos; e, em alguns, ele usa uma técnica especial de relevo a fim de criar “vistas aéreas” das paisagens pintadas (ver Figs. 2-1 e 2-2). Nessas belas e detalhadas imagens topográficas, rios, vales e po voações são mostrados de maneira tão realista que se tem a vertiginosa impressão de estar vendo-as de avião.

Na maioria dos mapas, Leonardo deu ênfase especial às redes de rios e lagos, talvez por se ocupar na época de algum projeto hidráulico na região. Por exemplo, vários mapas detalhados da bacia do Arno (Fig. 2-1) foram produzidos em conexão com seu plano de construir um gigantesco canal para cruzar esse rio.[24] Do mesmo modo, o grande e belo mapa do vale de Chiana (Fig. 2-2) pode ter servido para ilustrar a ideia de aproveitar o lago Trasimeno, que ali aparece em destaque, como fonte de água para o Arno durante os meses secos de verão.

Figura 2-1: *Mapa topográfico da região noroeste de Florença, mostrando Lucca, Pistoia e Prato (ao norte) e o vale do Arno (ao sul), bem como a trajetória do canal concebido por Leonardo, c. 1503-04, Coleção Windsor, Desenhos e mapas esparsos RL 12685r.*

Um traço curioso desse mapa é que Leonardo distorceu acentuadamente as escalas relativas de seu centro e periferia para incluir as partes afastadas no formato planejado, pintando embora, com exatidão, a continuidade do terreno e seus intricados cursos de água. Suponho que isso deva ser visto como um exemplo do pensamento “topológico” também evidente em muitos estudos arquitetônicos e diagramas matemáticos de Leonardo.[25]

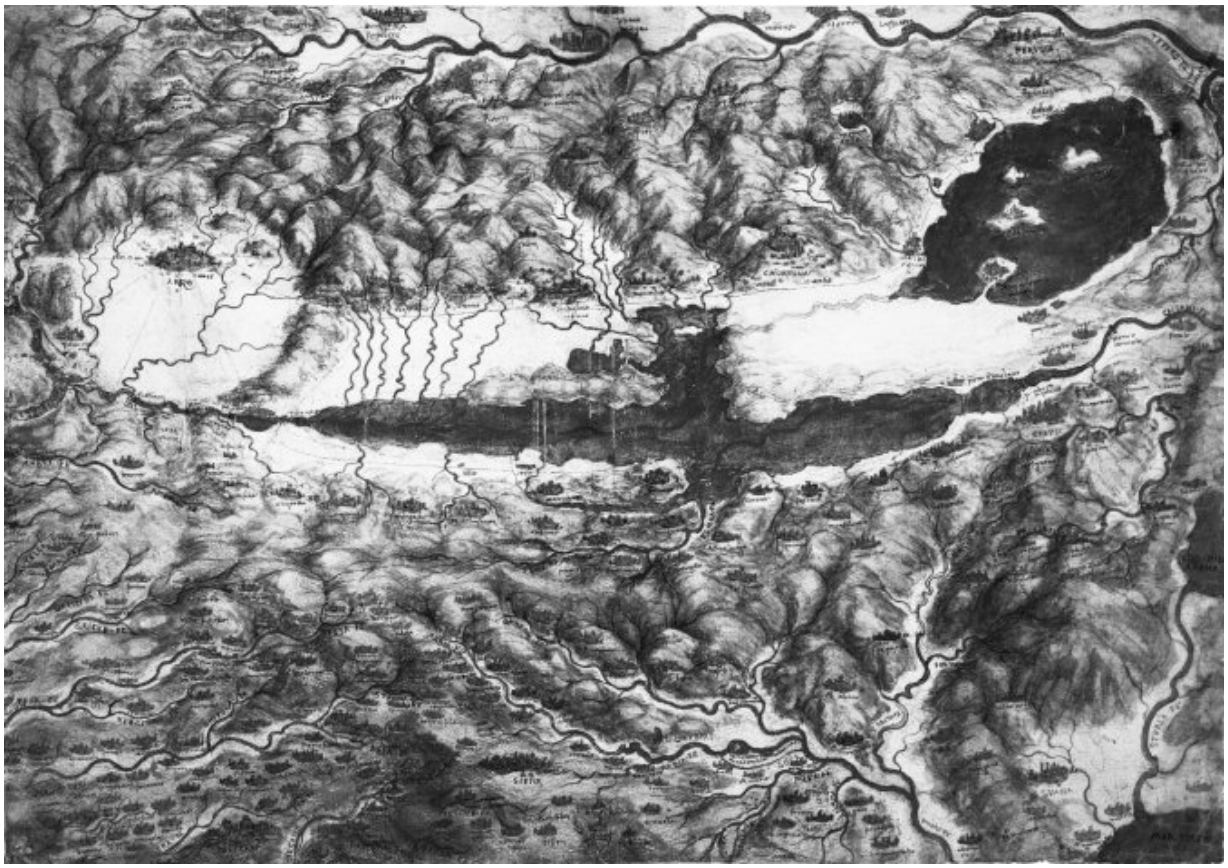


Figura 2-2: *Vista aérea do vale de Chiana, mostrando as cidades de Arezzo, Perúgia, Cortona e Siena, c. 1502, Coleção Windsor, Desenhos e mapas esparsos RL 12278r.*

Como servissem de material de apoio para estratégias militares ou projetos de engenharia hidráulica, os mapas de Leonardo tinham quase sempre de ser bastante exatos e minuciosos; mas muitos deles são também obras de arte que pintam povoados e construções em seu ambiente natural. Nesses desenhos, os cursos de água e os traços geológicos incorporam a vitalidade e o movimento contínuo das formas vivas da Terra. Essa firme convicção de uma Terra viva é transmitida até em alguns mapas de cidades feitos por Leonardo. O mais famoso, bastante detalhado, é o de Imola, uma pequena cidade na Emília-Romanha, Itália, onde ele passou vários meses, durante o inverno de 1502,

como engenheiro militar a serviço de César Borgia.[26] Desenhou novos baluartes para a fortaleza da cidade e elaborou um mapa altamente original (Fig. 2-3) em que as ruas principais, as muralhas e as rotas estratégicas são mostradas com a maior precisão, além de várias direções e distâncias de outras cidades.

Figura 2-3: *Mapa de Ímola, 1502, Coleção Windsor, Desenhos e mapas esparsos RL 12284.*

O que torna o mapa de Imola tão notável e tão belo é a opção artística de Leonardo por inserir a vista “aérea” exata da cidade fortificada em seu ambiente natural de campos, estradas e edifícios, com ênfase nos meandros do rio

Santerno, ali perto. Nas palavras do historiador da arte Daniel Arasse:

> Esse mapa, verdadeira síntese de ciência e arte, reflete o fascínio de Leonardo pelo mundo natural e pela maneira, ao mesmo tempo gloriosa e frágil, com que a atividade humana expressa nele sua racionalidade. Enquanto a vista das casas de Imola denota a elegância de sua geometria, as curvas admiráveis do Santerno revelam, como os tributários dos rios e regatos da Itália central, semelhantes a um emaranhado de veias, a admiração pela "vida da terra" – esse organismo, esse macrocosmo vivo.[27]

TEMPO GEOLÓGICO

Leonardo empreendeu estudos cuidadosos e detalhados não apenas da erosão, mas também do processo correspondente de sedimentação – o depósito, na foz dos rios e no oceano, de fragmentos de rocha suspensos. Ele reconheceu que a sedimentação muitas vezes ocorre em camadas sucessivas:

> As rochas estratificadas das montanhas são todas feitas de camadas de lama que rios e regatos vão depositando uma em cima da outra (...). As diferentes espessuras dos estratos das rochas se devem aos diferentes fluxos dos rios, que podem ser maiores ou menores.[28]

Em particular, Leonardo discerniu uma estrutura sedimentar específica conhecida pelos modernos geólogos como "leito graduado", na qual o tamanho dos grãos dos sedimentos diminui de baixo para cima numa única camada, ou "leito", e explicou corretamente sua formação:

> Cada estrato é composto por partes mais pesadas e mais leves; a mais baixa é a mais pesada. Isso se dá porque os estratos são constituídos por sedimentos lançados no mar pelas correntes dos rios que a ele vão ter. A parte mais pesada desse sedimento é a que foi descarregada primeiro na sequência.[29]

Em seus desenhos e pinturas, Leonardo registrou inúmeras estruturas geológicas com extraordinária precisão. Em sua obra-prima *A Virgem e o Menino com Santa Ana*, um belíssimo exemplo de leito graduado surge aos pés de Santa Ana (Gravura 5). A diminuição do tamanho dos grãos da parte inferior à superior do leito é claramente visível.

O fato de Leonardo ter percebido sequências temporais nos estratos do solo e das rochas, constatando ainda que os vales são criados graças à água corrente, levou-o a uma importante conclusão: as formas da Terra resultam de processos lentos que se desenvolvem em períodos longos hoje conhecidos como tempo geológico. “As coisas são muito mais velhas que as letras”, escreveu ele no Codex Leicester, “portanto não nos surpreendamos ao constatar em nossos dias a inexistência de quaisquer registros do modo como os mares se estenderam sobre tantos países (...). Basta-nos, porém, o testemunho das coisas nascidas em águas salgadas que encontramos no alto das montanhas, às vezes bem longe dos mares”.[30]

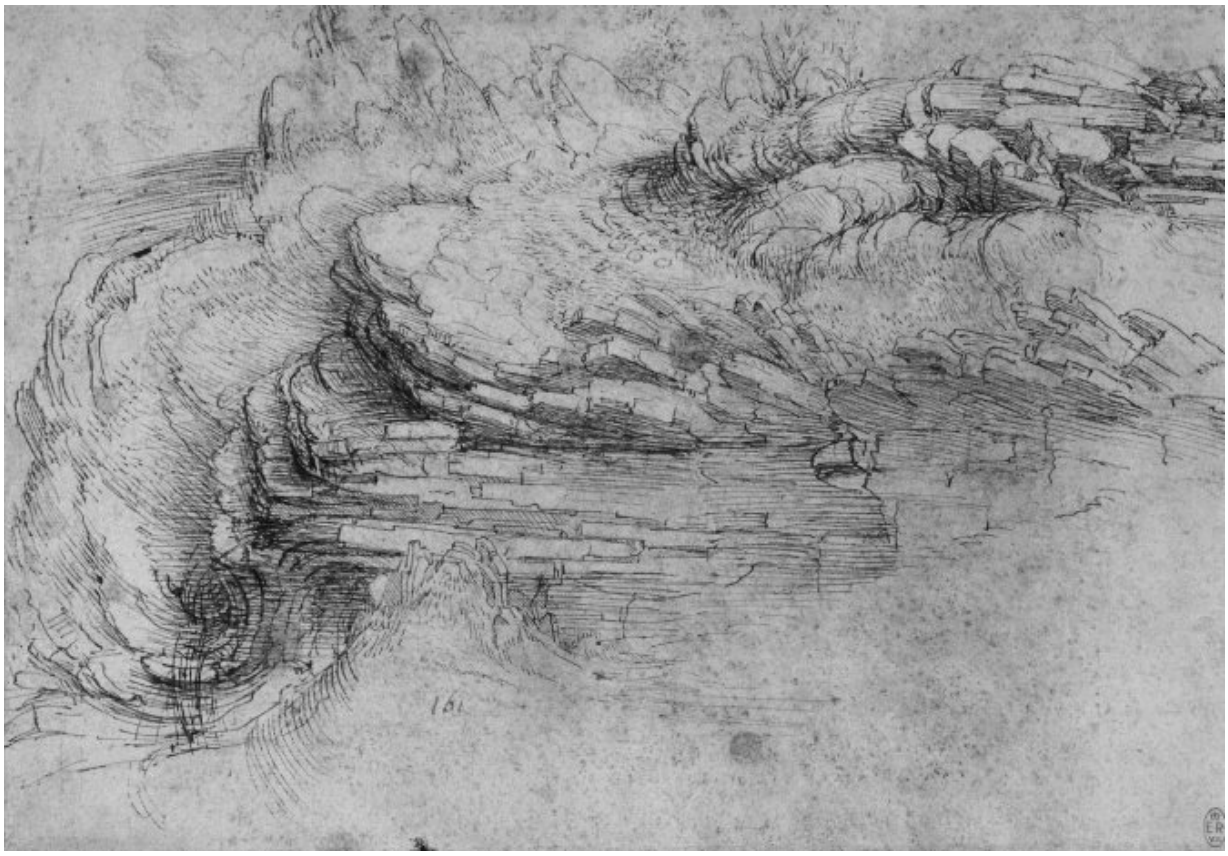


Figura 2-4: *Afloramento horizontal de rocha, c. 1510-1513, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 53r.*

Com essa visão, Leonardo estava séculos à frente de seu tempo. Os geólogos só se deram conta da grande duração do tempo geológico no início do século XIX, com o trabalho de Charles Lyell, muitas vezes considerado o pai da geologia moderna.[31] Leonardo percebeu plenamente a importância do tempo geológico para o saber científico como um todo. “Conhecer o passado e a superfície da Terra é ornar e nutrir a mente humana”. escreveu ele no Codex Atlanticus.[32]

Leonardo foi também o primeiro a introduzir a noção de dobras de estratos rochosos (*piegamenti delle falde delle pietre*).[33] Sua ideia de que as rochas se formam, em longos períodos de tempo, de camadas sedimentares e são depois

moldadas e dobradas por tremendas forças geológicas aproxima-se muito da perspectiva evolucionária. Leonardo chegou a essa concepção trezentos anos antes de Charles Darwin, que também se inspirou na geologia, sobretudo nas obras de Lyell, para elaborar a teoria evolucionista.[34]

A Coleção Windsor contém o desenho de um afloramento horizontal de rocha (Fig. 2-4) que ilustra de maneira vívida a ideia de Leonardo sobre os processos geológicos evolucionários. Mostra estratos horizontais de uma rocha sedimentar que foi severamente erodida e deformada. “Esse desenho revela com clareza a mão modeladora do tempo”, escreve Martin Kemp, “e é o testemunho das poderosas forças que deram aos estratos sua conformação distorcida”.[35]

Uma formação geológica que sempre fascinou Leonardo são os pináculos denteados que aparecem frequentemente ao fundo de suas pinturas. Essas torres rochosas constituem os restos de longos processos de erosão que eliminaram as camadas mais frágeis e expuseram as mais duras, mais resistentes às intempéries. Processos de erosão e desgaste por agentes atmosféricos aparecem claramente no primeiro desenho que Leonardo fez de formações rochosas, uma ravina de pedra com aves aquáticas, elaborado cerca de 1483, pouco depois de sua chegada a Milão (Fig. 2-5).

O traço dominante do desenho é um penhasco que perdeu quase toda a sua camada de terra e vegetação, exceto por algumas árvores retorcidas que se agarram precariamente à borda. A rocha toda se fendeu em grandes blocos verticais, uma série de picos e algumas pedras arredondadas de tamanho cada vez menor por causa da

ação persistente das intempéries e da água ao longo das eras. Como no desenho anterior, há o senso palpável de transformação e movimento contínuos.

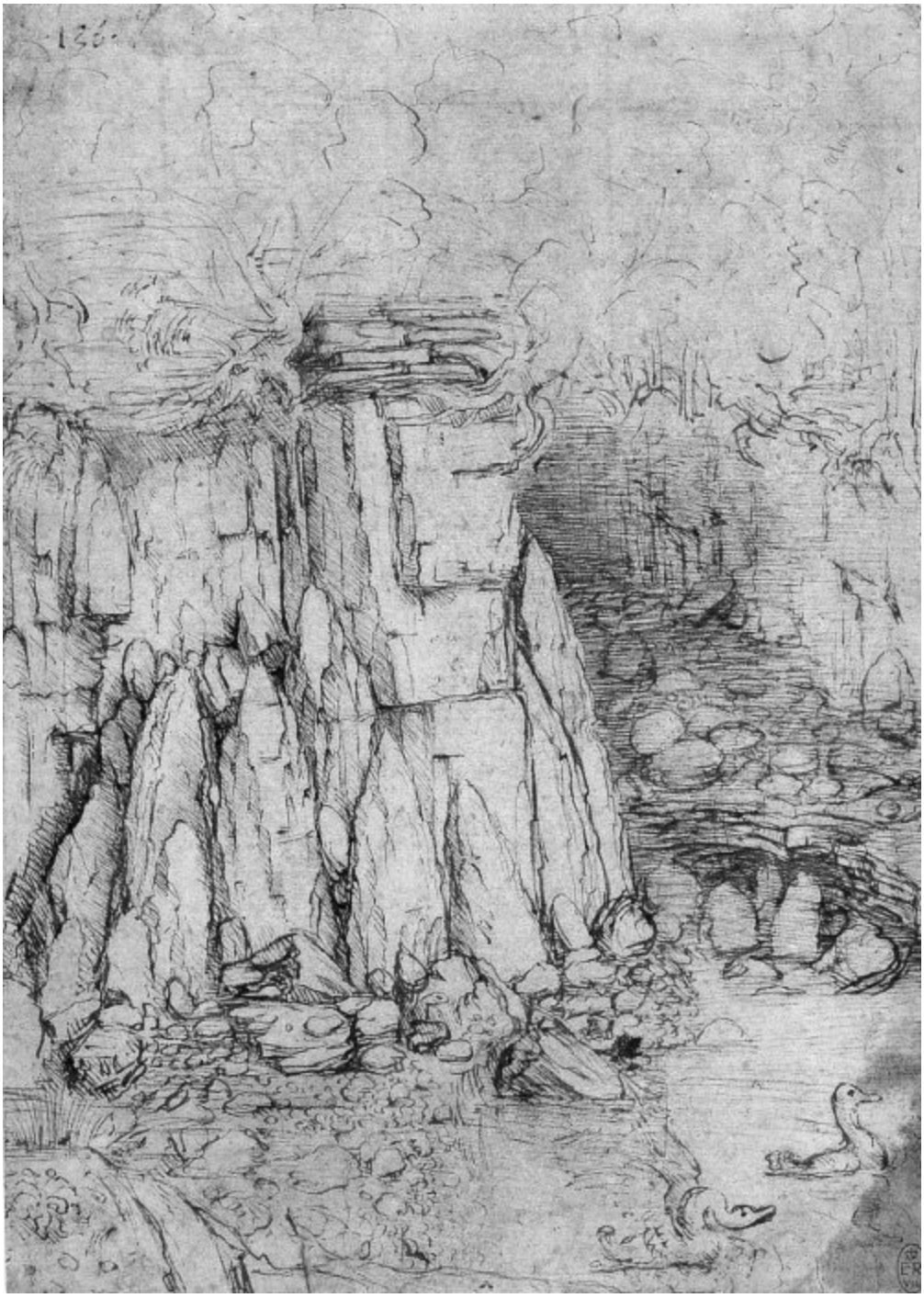


Figura 2-5: *Regato correndo por uma ravina de pedra, c. 1483, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 3r.*

A VIRGEM DO ROCHEDO

O registro mais minucioso e sofisticado que Leonardo nos legou das formações rochosas está numa de suas antigas obras-primas, *A Virgem do Rochedo*, hoje no Museu do Louvre (Gravura 3). A pintura, executada entre 1483 e 1486, provocou alvoroço nos círculos artísticos e intelectuais de Milão, assinalando o início da duradoura fama de Leonardo como pintor.[36] A obra é notável por vários motivos. Foi revolucionária na combinação de luz e sombra (*chiaroscuro*). Seus tons suaves de verde-oliva e cinza contrastam vivamente com as cores brilhantes da arte quinhentista italiana, enquanto sua composição representa uma complexa e controversa meditação sobre o destino de Jesus.[37] Além disso, *A Virgem do Rochedo* testifica os poderes de observação científica de Leonardo, além de seu conhecimento, inigualado na época, das formações geológicas e do crescimento das plantas.

A geóloga Ann Pizzorusso, que empreendeu um estudo pormenorizado dos traços geológicos da pintura, chamou-a de "um *tour de force* geológico" por causa da sutileza com que Leonardo tratou uma complicada formação geológica.[38] Como ela mostra em seu ensaio, as diferentes rochas da gruta, que ainda não tinham nome quando Leonardo as estudou e pintou, são representadas com tamanha exatidão que podem mesmo ser identificadas e descritas, nos termos técnicos adequados, por um geólogo moderno.

Uma distinção capital feita na geologia moderna é entre rochas sedimentares e ígneas. As primeiras se formam na superfície da Terra, ou perto dela, por sedimentação e posterior consolidação de fragmentos rochosos e minerais

dissolvidos. As segundas, ao contrário, se formam na crosta terrestre quando o magma líquido esfria e se cristaliza. Uma vez que o material rochoso derretido é menos denso que a rocha sólida, tende a subir para a superfície. Pode também ser ejetado como lava pelos vulcões ou introduzir-se entre as camadas de rochas sedimentares abaixo da superfície e ali se cristalizar em rocha ígnea. A pressão fluida do magma introduzido às vezes é tão forte que ergue as camadas de rocha superpostas.[39]

Graças a seus profundos estudos geológicos, Leonardo conhecia bem os processos de sedimentação e compactação de fragmentos em rochas sedimentares; entretanto, é duvidoso que soubesse a origem das rochas ígneas. Embora elas possam ser vistas depois que a erosão as expõe na superfície da Terra, sua formação dentro da crosta só pode ser estudada indiretamente e representa um sério desafio aos geólogos mesmo hoje. Mas ainda assim é surpreendente o fato de Leonardo, a partir de observações meticulosas, desenhar nos mínimos detalhes as texturas rochosas, a ponto de modernos geólogos conseguirem reconhecer facilmente os sinais dos processos geológicos que as formaram.

Em *A Virgem do Rochedo*, Leonardo pintou uma complicada formação geológica resultante da intrusão de uma rocha ígnea extremamente dura, conhecida como diábase, entre as camadas macias de arenito, que é uma das rochas sedimentares mais comuns.[40] Tanto o arenito quanto a diábase estão desgastados e Leonardo mostra claramente que as superfícies dos dois tipos de rocha foram agredidas de maneira diversa, conforme suas respectivas

durezas. “O resultado”, explica Pizzorusso, “é uma descrição exata de arenito desgastado que foi invadido por diábase, esta bem mais resistente e portanto capaz de preservar suas características estruturais”.[41] Pizzorusso ilustra sua análise da geologia de *A Virgem do Rochedo* com um esboço dos principais traços do quadro, ao qual acrescentou os termos técnicos das formações rochosas mostradas (ver Fig. 2-6).

No alto da gruta, vemos montículos arredondados (“esfericamente desgastados”) de arenito, já decompostos o bastante para permitir que raízes se prendam a eles e plantas cresçam no local. Acima da cabeça da Virgem, projetando-se em relevo vertical, está a diábase, que se introduziu entre as camadas de arenito e levantou a de cima no distante passado geológico, ligando desse modo os dois estratos com uma folha de rocha dura ou “soleira”. Esfriando, a diábase se contraiu e produziu rachaduras verticais com bordas finas, conhecidas como fraturas ou juntas colunares.

A camada de arenito, abaixo da diábase, mostra o mesmo padrão arredondado de desgaste que afetou a camada de cima; e as superfícies de contato entre os dois tipos de rocha estão claramente indicadas por linhas horizontais. Leonardo observou, também corretamente, que nenhuma vegetação cresce na diábase, muito dura e resistente à erosão para dar suporte a plantas.

Na frente da gruta, o arenito não está excessivamente desgastado e reteve, portanto, sua estrutura original. As típicas camadas horizontais (ou “leitos”) foram pintadas com a maior exatidão. Enfim, no fundo distante, podemos

perceber os pináculos rochosos que aparecem em tantos desenhos e quadros de Leonardo. Conforme já mencionamos, eles são o que restou de processos de erosão no passado remoto, os quais eliminaram as camadas macias de rocha e expuseram as mais duras, mais resistentes às intempéries.

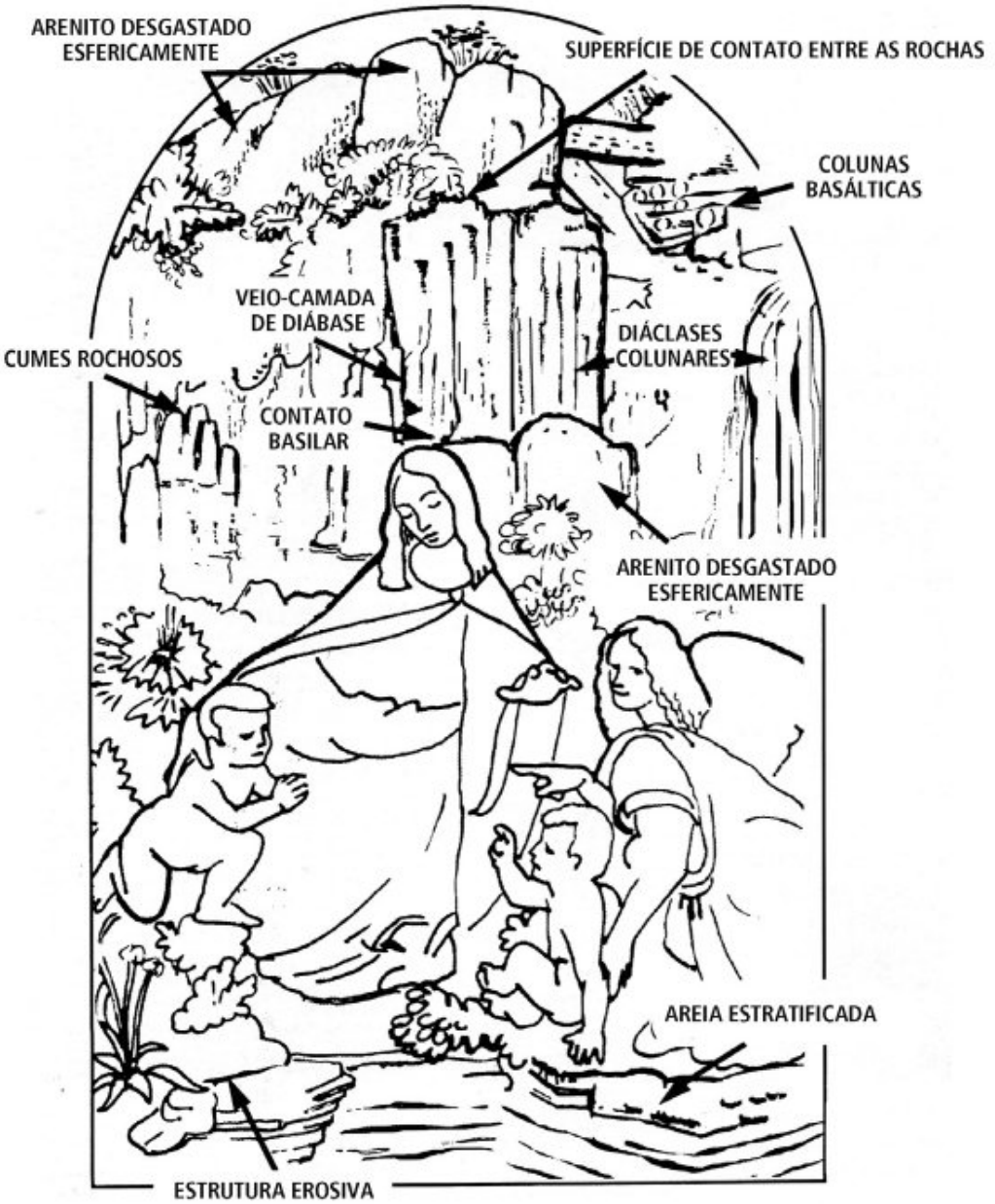


Figura 2-6: *Traços geológicos em A Virgem do Rochedo, de Leonardo; extraído de Pizzorusso (1996).*

Leonardo produziu duas versões de *A Virgem do Rochedo*. A data e as circunstâncias da segunda, hoje na National Gallery de Londres, não são muito claras e os historiadores da arte acreditam que Leonardo haja permitido a seu colega pintor, Ambrogio Predis, executar partes extensas do quadro.[42] Essa tese parece confirmada pela comparação dos detalhes geológicos em ambas as pinturas, feita por Ann Pizzarusso. Ela presume que, embora as diferenças entre as formações rochosas nas duas versões possam não ser imediatamente perceptíveis pelos leigos, uma avaliação mais cuidadosa revela que a execução dos detalhes na versão londrina é claramente inferior à da versão do Museu do Louvre, Paris.

"O observador com algum conhecimento de geologia", escreve Pizzorusso, "logo percebe que as formações rochosas representadas na obra da National Gallery não correspondem à natureza". Graças a uma detalhada análise geológica, ela demonstra que as rochas na versão de Londres são "caracterizações sintéticas, artificiais"; e conclui: "Parece improvável que a mesma pessoa haja pintado formações geológicas tão exatas na obra do Louvre e tão incongruentes na da National Gallery."[43] À mesma conclusão chegou o botânico William Emboden depois de comparar os detalhes botânicos nas duas versões de *A Virgem do Rochedo*.[44]

O ENIGMA DOS FÓSSEIS

Em seus extensos estudos da sedimentação, Leonardo não deixou de notar que as rochas sedimentares dos Apeninos,

ao norte da Itália, continham inúmeros fósseis e identificou-os acertadamente como traços de organismos que viveram no passado distante:

> Entre os diversos estratos das rochas ainda se veem as trilhas dos vermes que rastejaram sobre elas quando não estavam ainda secas [e] a lama marinha contém conchas, petrificadas com essa lama.[45]

A existência dos fósseis é conhecida desde a Antiguidade. Vários autores clássicos e medievais falaram sobre eles sem reconhecer sua verdadeira natureza e idade. Leonardo conhecia bem esses textos[46] e teve inúmeras oportunidades de observar espécimes bem preservados de fósseis de plantas e animais. Chega mesmo a contar que uma grande quantidade de conchas fossilizadas, em perfeitas condições, foram levadas para ele em Milão:

> Nas montanhas de Parma e Piacenza, bom número de conchas e corais com buracos de vermes ainda podem ser vistos grudados às rochas. Quando eu estava fazendo o grande cavalo em Milão, um saco cheio deles, encontrados naquelas regiões, foi levado ao meu ateliê por alguns camponeses; e havia alguns perfeitamente conservados em sua condição original.[47]

Os fósseis marinhos representavam um enigma que os filósofos naturais vinham debatendo desde a Antiguidade. Se as conchas fossilizadas eram de fato remanescentes de organismos marinhos, como haviam ido parar em estratos sedimentares que agora se encontravam no alto das montanhas, centenas de metros acima do nível atual do mar? Leonardo estava bem ciente do problema:

> Como explicar o número infinito de espécies de folhas petrificadas nas rochas dessas montanhas tão altas, entre elas algas marinhas no meio de conchas e areia? Ali se veem também muitos outros tipos de coisas petrificadas, como caranguejos do mar em pedaços, espalhados e misturados com as conchas.[48]

A fim de solucionar o enigma, Leonardo estudou uma ampla variedade de corpos fósseis (remanescentes de organismos) e traços fósseis (trilhas de vermes e caracóis) com o máximo cuidado. Partindo de observações minuciosas e sofisticadas, apresentou suas conclusões numa exposição sistemática que ocupa várias páginas do Codex Leicester e que, juntamente com uma série de argumentos lúcidos e originais, refuta as teorias em voga na Renascença. A exposição de Leonardo é um exemplo de raciocínio científico brilhante, que resultou na primeira explicação correta da natureza dos fósseis. Essa ideia só reapareceria na ciência ao fim do século XVIII.

Durante a Idade Média e o Renascimento, a crença mais comum a respeito da origem das conchas fósseis encontradas nas montanhas era que elas tinham sido levadas até lá, do mar, nas vagas enormes e nas fortes correntes do dilúvio de Noé, o Grande Dilúvio da Bíblia. Outra teoria, mais esotérica, preceituava que esses fósseis não eram remanescentes de organismos marinhos e sim tipos especiais de minerais, criados ali mesmo nas montanhas pela intervenção divina ou crescidos nas rochas como resultado de “influências celestes”. Leonardo via com desdém essas duas teorias. Escreveu sobre “a estupidez e ingenuidade de quem imagina que tais criaturas foram carregadas para lugares tão distantes do mar pelo Dilúvio” e “uma outra seita de ignorantes para a qual a natureza ou os céus as criaram naqueles locais por influências celestes”.[49]

No Codex Leicester, Leonardo apresenta cinco argumentos de peso contra a teoria diluviana. Observa que os fósseis aparecem em várias camadas de rochas

sedimentares depositadas em diferentes tempos sequenciais – e isso não condiz com a história bíblica de um único dilúvio. “Se dissermos que houve muitos dilúvios para produzir as camadas e as conchas dentro delas”, argumenta Leonardo, “teremos de afirmar também que houve dilúvios todos os anos”.[50] Além disso, raciocina ele, segundo a tradição bíblica o Dilúvio subiu “sete côvados acima da montanha mais alta” e, portanto, as conchas teriam sido depositadas nos cumes. Mas, bem ao contrário, elas são encontradas sobretudo perto da base “e sempre no mesmo nível, camada após camada”.[51]

Além desses dois pontos básicos, Leonardo recorre a observações altamente sofisticadas em apoio de mais três argumentos. Os estratos fósseis depositados por fortes correntes, explica ele, não preservariam os traços e trilhas dos organismos marinhos que encontrou em rochas sedimentares. A seu ver, essas trilhas são uma prova importante de que as criaturas marinhas estavam vivas no ambiente onde ocorreu a fossilização, não tendo sido levadas até lá como animais mortos pelo Dilúvio. Não bastasse isso, “se o Dilúvio transportasse conchas por distâncias de trezentas ou quatrocentas milhas do mar, faria isso misturando-as com várias outras espécies, todas amontoadas”. Mas em vez disso: “A essas distâncias, o que vemos são ostras juntas, mariscos juntos e chocos juntos, bem como outras conchas que se congregam”.[52]

Leonardo informa a seguir que viu alguns fósseis de bivalves (ostras, mexilhões e outros do mesmo tipo) com as duas partes ainda unidas. Ora, como estas não são coladas uma à outra em vida, mas ligadas por uma membrana

elástica que apodrece rapidamente após a morte, o transporte a longa distância numa inundação teria separado as duas valvas. Portanto, esses animais foram sepultados no mesmo lugar onde viveram:

> Nas bordas das rochas, encontramos alguns com valvas duplas, como aqueles que o mar deixou para trás e foram enterrados vivos na lama, a qual, com o tempo, secou e depois se petrificou.[53]

Depois de estabelecer que os fósseis marinhos não poderiam ter sido transportados até as montanhas, como animais mortos, pela correntes do Dilúvio, Leonardo combate o argumento de que eles talvez hajam migrado para lá durante a inundação. Explica com riqueza de detalhes que a amêijoa, um molusco bivalve frequentemente encontrado em estado fóssil, é uma criatura muitíssimo lenta que, no período de quarenta dias tradicionalmente atribuído ao Dilúvio bíblico, nunca teria se afastado tanto do mar:

> A amêijoa é um animal cujos movimentos não são mais rápidos que os do caracol, quando fora da água, e parecem mesmo mais vagarosos porque ela não nada, apenas abre um sulco na areia; e, usando esse sulco como apoio, percorre de três a quatro *braccia* por dia. Assim, uma criatura tão lenta não teria conseguido, em quarenta dias, viajar do mar Adriático até Monferrato, na Lombardia, que fica 250 milhas distante da costa.[54]

Em algumas páginas do Codex Leicester, Leonardo também descarta a crença de que os fósseis são minerais especiais nascidos nas próprias montanhas sob a influência de forças celestes. Sustenta que esses minerais surgiriam em todos os estratos de rochas e não apenas naqueles que mostram evidências claras de origem marinha. “Onde os

vales não foram cobertos por água salgada do mar", afirma ele, "nunca se encontram conchas".[55]

Leonardo argumenta também que as conchas fósseis devem ter sido parte de organismos vivos no passado porque exibem traços observáveis em outras formas de vida. Nota, em particular, que a idade de uma concha fóssil pode muitas vezes ser determinada com base nos anéis de crescimento, que registram ciclos de meses e anos:

> Nesses lugares (...) [podemos] contar nas crostas das amêijoas e dos caracóis os anos e meses de sua vida, como fazemos nos chifres de bois e carneiros, e ainda nos galhos de árvores que nunca foram podados.[56]

Essa afirmação é um exemplo brilhante do pensamento sistêmico que permeia a ciência de Leonardo. Para ele, entender um fenômeno significava sempre aproximá-lo de outros fenômenos por intermédio de uma similaridade de padrões. Que tenha sido capaz de associar os anéis anuais dos galhos de árvores aos anéis de crescimento dos chifres de bois e carneiros, já é suficientemente notável; mas empregar a mesma análise para inferir o período de vida de uma concha fossilizada, é simplesmente extraordinário. Como assinalou o biólogo Stephen Jay Gould, esse exame das periodicidades do crescimento só se tornou um tema importante e rigoroso da paleobiologia no século XX.[57]

Implícita em toda a argumentação de Leonardo está a tentativa de explicar a origem dos fósseis em termos de processos naturais, observáveis no presente, e não de eventos miraculosos ou catastróficos do passado. Essa concepção foi formulada explicitamente, com o nome de princípio uniformitarista, pelo geólogo escocês James Hutton no século XVIII e depois estabelecida firmemente, no século

XIX, por Charles Lyell. Essas ideias gêmeas – de que as mudanças ocorridas outrora na superfície da Terra deveram-se a forças e processos ainda hoje operantes, e de que esses processos ocorreram em períodos muito longos de tempo – tornaram-se desde então pedras angulares da moderna geologia. Ambas foram aventadas primeiro por Leonardo da Vinci e eram parte integrante de sua ciência da Terra viva.

As explicações de Leonardo sobre a natureza dos fósseis vinham acompanhadas de descrições precisas dos sítios específicos onde ele observara esses depósitos. Segundo o historiador da geologia François Ellenberger, "é justificável, sem ser anacrônico, falar de paleoecologia (...). O moderno geólogo só pode ficar surpreso ao ler esses textos, nos quais não há nada de errado nem de inútil".[58]

Além de catalogar os ambientes sedimentares de fósseis, como são chamados hoje pelos geólogos, Leonardo descreve os próprios processos de fossilização em grande minúcia. "Como convinha a um escultor habituado à fundição do bronze", escreve o historiador da arte Martin Kemp, "Leonardo deixou reconstruções maravilhosamente vívidas da fundição de conchas, exoesqueletos e organismos completos dentro de seus moldes de barro".[59]

"Quando a natureza está prestes a criar pedras", explica Leonardo, "produz uma espécie de pasta pegajosa que, ao secar, se transforma numa massa sólida juntamente com aquilo que encerrou em si mesma. Contudo, não o transforma em pedra, antes o preserva ali dentro tal qual o encontrou".[60] No Manuscrito F, reserva três páginas a descrições pormenorizadas desse processo nos fósseis de

moluscos (“animais que têm os ossos do lado de fora”) e de peixes (“animais que têm os ossos por baixo da pele”), bem como nas impressões das folhas.[61] A descrição da fossilização dos peixes, em especial, é uma mostra impressionante da imaginação viva e perspicaz de Leonardo:

> À medida que os rios baixam com o tempo, essas criaturas, envoltas em lama, com a carne e os órgãos eliminados, preservam os ossos, mas perdem seu arranjo natural, descendo para a parte de baixo do molde formado por sua impressão. Quando a lama sobe acima do nível do rio, seca e forma primeiro uma pasta pegajosa, para depois se transformar em pedra; desse modo, sela aquilo que contém, preenchendo todos os interstícios. E, já com a impressão do animal por dentro, penetra aos poucos as minúsculas fissuras na terra, de onde o ar escapou para os lados. Ele não pode escapar para cima por causa do sedimento que caiu sobre a cavidade, nem para baixo porque o sedimento já depositado bloqueou a porosidade. Restam então apenas as saídas laterais, pelas quais o ar, condensado e sob a pressão do sedimento que cai, escapa com a mesma lentidão com que o sedimento ali se deposita; secando, a pasta se transforma em pedra destituída de grânulos e preserva as formas das criaturas que nela deixaram sua impressão, encerrando-lhes os ossos dentro de si.[62]

A FORMAÇÃO DAS MONTANHAS

Recorrendo a observações meticulosas e a um raciocínio convincente, Leonardo demonstrou que os fósseis marinhos, encontrados nas rochas montanhosas, foram formados nos ambientes fluviais e oceânicos, onde essas criaturas viveram no passado remoto. Seus argumentos brilhantes invalidaram as teorias em voga na época, mas não solucionaram o enigma dos fósseis, como ele mesmo reconheceu. Precisava ainda descobrir como as camadas de sedimentos marinhos foram parar no alto das montanhas. Ou seja, necessitava de uma teoria sobre a formação das montanhas durante os períodos incalculavelmente longos

do tempo geológico. E não hesitou em encarar esse formidável desafio.

A origem das montanhas e, em geral, a formação da Terra eram tópicos discutidos pelos filósofos desde a Antiguidade.[63] Leonardo conhecia bem muitos textos clássicos, inclusive a famosa *Cosmografi a* de Ptolomeu e a enciclopédica *História Natural* de Plínio, que contém resumos de quase quinhentos autores gregos e romanos.[64]

Na filosofia grega, houve duas escolas de pensamento que trataram da formação das montanhas. Segundo Eratóstenes, contemporâneo de Arquimedes no século III a.C., o nível do mar Mediterrâneo fora muito mais alto numa época em que tanto o estreito de Gibraltar quanto o do Bósforo estavam fechados; então, a certa altura, as "Colunas de Hércules" (estreito de Gibraltar) se fenderam, rebaixando o nível do mar e fazendo com que as montanhas aparecessem. As provas do antigo nível do mar, ainda segundo Eratóstenes, estavam na existência de fósseis naquelas montanhas. A outra escola de pensamento era representada pelo geógrafo Estrabão, no século I a.C. A seu ver, as montanhas se originaram de terremotos, erupções vulcânicas e outras catástrofes naturais. Nenhuma dessas duas teorias era inteiramente satisfatória e seus méritos relativos foram debatidos por séculos. Os habitantes dos países mediterrâneos estavam bastante familiarizados com as erupções vulcânicas, que apareciam em muitas lendas, como a da Atlântida. Mas elas não podiam explicar os depósitos de conchas e outros fósseis, conforme o próprio Estrabão teve de reconhecer. Eratóstenes, por sua vez, não

explicou que tipo de catástrofe abrira as Colunas de Hércules.

No que diz respeito à questão mais geral da formação da Terra, também havia várias opiniões. Aristóteles ensinou que a Terra era eterna e continuamente reparava as degradações causadas pela erosão criando novas montanhas. Para os estoicos, os sinais visíveis de decadência eram a prova de que a Terra um dia acabaria. Entretanto, achavam que depois ela mesma se recriaria e que, dessa maneira, mundos sucessivos surgiriam um após outro.

Essas eram visões puramente filosóficas, expostas sem nenhuma preocupação de descrever os processos geológicos aplicáveis. Uma teoria interessante e bem mais detalhada foi a do poeta e filósofo romano Lucrécio, no século I a.C. Ele sustentou que a Terra se formou a partir de uma massa caótica de átomos de todos os tipos. À medida que a matéria se condensava, prosseguia ele, o chão começou a baixar. Mas em alguns lugares esse processo foi obstruído pelo acúmulo de rochas, dando origem assim às montanhas.

Durante a Idade Média, o conhecimento da Antiguidade greco-romana se perdeu quase por completo na Europa ocidental. Mas os estudiosos muçulmanos assimilaram-no, traduzindo os textos clássicos para o árabe e acrescentando-lhes seus próprios comentários e inovações.[65] Os filósofos naturais árabes reviveram o debate clássico entre as escolas de Eratóstenes e Estrabão, as quais, por tomar de empréstimo a terminologia adotada numa polêmica entre geólogos sobre questões parecidas, ao

fim do século XVIII, poderiam ser chamadas de “netunista” e “plutonista” – nomes inspirados nas divindades romanas do mar e dos infernos, respectivamente.

Segundo o netunismo (do nome do deus romano do mar), a Terra é continuamente desgastada pela erosão e o material erodido vai para os oceanos, onde montanhas e colinas crescem aos poucos a partir dos depósitos. Isso eleva o nível das águas, enquanto a altura das montanhas na terra vai diminuindo lentamente. A certa altura, o mar escapa de sua bacia, invade a terra e expõe montanhas que antes estavam submersas. Assim, planícies se transformam em oceanos, oceanos se transformam em planícies e montanhas. Tais mudanças, acreditavam os netunistas, ocorrem periodicamente em vastos ciclos de 36 mil anos.

Para nossa mentalidade moderna, essa teoria parece estranha, pois é obviamente inconsistente com as leis básicas da gravidade e do fluxo de água. No entanto, a crença netunista de que todas as montanhas foram formadas por estratos de depósitos no fundo dos oceanos persistiu entre os naturalistas até o século XIX.

Oposto ao netunismo era o plutonismo (do nome do deus grego do mundo subterrâneo), segundo o qual forças verticais no interior do planeta levantavam ou abaixavam a terra. Entre os adeptos dessa teoria, nos séculos X e XI, estava o grande médico Avicena (Abu Ali Ibn Sina).[66] Duzentos anos depois, o filósofo escolástico Alberto Magno, mestre de Tomás de Aquino, propôs uma teoria similar: as montanhas eram erguidas por vapores liberados do interior da Terra.

Entretanto, apesar do prestígio desses estudiosos, o plutonismo (ou “vulcanismo”, como também era chamado) não foi de modo geral aceito nos séculos que se seguiram. É que ele implicava o pressuposto de que havia fogo no centro do planeta. Hoje, sabemos que o interior da Terra consiste de rocha derretida, o magma.[67] Mas, na Idade Média e na Renascença, a ideia de um fogo central na Terra era inconcebível porque contrariava a cosmologia aristotélica então aceita.

Segundo Aristóteles, os quatro elementos se dispõem naturalmente, por si mesmos, em esferas concêntricas: a terra está no meio, rodeada sucessivamente pelas esferas de água, ar e fogo (ou luz). Explicava ele que os elementos são o tempo todo perturbados e impelidos para as esferas contíguas, mas depois voltam naturalmente a seus devidos lugares. Portanto, os filósofos medievais podiam aceitar a existência ocasional de fogo no interior da Terra, conforme evidenciado pelos vulcões, mas jamais conceberiam que ele ocupasse ali um posto permanente. Com efeito, a autoridade de Aristóteles era tamanha que a ideia de fogo ou calor subterrâneo só passou a ser considerada seriamente no século XVIII, quando o geólogo escocês James Hutton usou-a para explicar a origem ígnea do granito.

Com respeito às teses dos teólogos cristãos, não houve unanimidade em torno da cosmologia na Idade Média. Segundo o Antigo Testamento, a Terra é um disco achatado que flutua no oceano, tendo por cima o firmamento sustentado por colunas. No entanto, é mero clichê popular a noção de que todas as pessoas, nos tempos medievais,

imaginavam a Terra como um disco achatado. Na verdade, a maioria dos estudiosos, da Antiguidade à Renascença, sabia que ela é esférica.[68]

Um obstáculo mais sério ao correto entendimento dos processos geológicos eram os ensinamentos bíblicos de que o mundo fora criado há apenas uns 6 ou 8 mil anos. Hoje, sabemos que mesmo o período bem maior de 36 mil anos proposto pelos estudiosos árabes em sua teoria do netunismo é curto demais para explicar algumas mudanças geológicas significativas.[69]

O primeiro a ampliar a noção de ciclos geológicos foi o erudito e filósofo francês Jean Buridan, no século XIV. A seu ver, a Terra consiste de dois hemisférios, um inteiramente aquoso e o outro terrestre, os quais de vez em quando se interpenetram de modo que os oceanos se transformam em terra e vice-versa, em ciclos de longa duração. Leonardo tomou conhecimento da teoria de Buridan por intermédio dos escritos de Alberto da Saxônia, um discípulo do erudito francês, e adotou a noção dos dois hemisférios como um importante elemento de sua própria teoria da formação das montanhas.[70] Mas, enquanto Buridan e Alberto acreditavam que a assimetria da Terra fora criada e regulada por Deus, Leonardo procurou explicar a complexa dinâmica do equilíbrio mutável do planeta, com a consequente elevação das montanhas, em termos de causas puramente naturais.

A TEORIA TECTÔNICA DE LEONARDO

Leonardo conhecia bem os principais textos sobre a formação da Terra escritos por autores medievais cristãos e

muçulmanos, de modo que usou algumas de suas principais ideias para formular sua própria teoria. Esta é uma complicada mistura de concepções aristotélicas e medievais combinadas com as observações que ele mesmo fez; e, como toda a sua geologia, inclui afirmações que hoje nos parecem surpreendentemente modernas. Considerando-se o fato de que a adequada compreensão da formação das montanhas em consequência do deslocamento de placas tectônicas só foi obtida no século XX, a teoria tectônica de Leonardo é realmente das mais notáveis.

Leonardo começa sua argumentação observando que, se o mundo fosse composto inteiramente de água, formaria uma esfera perfeita, como uma gota de orvalho: "A superfície da esfera de água não se move de seu perímetro em volta do centro do mundo, que ela rodeia a igual distância."[71] Em seguida, introduz a ideia de Buridan dos dois corpos que se interpenetram, um aquoso e o outro terrestre. Porém, ao contrário do filósofo escolástico, Leonardo raciocina como um cientista moderno, citando primeiro um experimento e depois utilizando evidência empírica para construir um modelo geométrico simples da Terra. Eis seu argumento:

> Uma gota de orvalho, perfeitamente redonda, nos oferece a oportunidade de considerar (...) como a esfera aquosa contém em si o corpo da terra sem que a esfericidade de sua superfície seja destruída. Se tomarmos um cubo de chumbo do tamanho de um grão de painço e, por meio de um fio muito fino a ele ligado, o mergulharmos na gota, veremos que esta não perderá sua esfericidade original, embora tenha sido aumentada por uma quantidade igual ao tamanho do cubo nela introduzido.[72]

Em vez de um cubo pequeno, prossegue Leonardo, poderíamos imaginar também uma pirâmide terrestre, ou

tetraedro, imersa na esfera de água com as pontas para fora. Esse é o modelo da Terra apresentado num esboço simples do Codex Leicester (ver Fig. 2-7), uma massa de terra parcialmente rodeada de água.

Notável aqui não é apenas o engenhoso emprego, por Leonardo, de um modelo teórico simples – técnica que se tornaria parte integrante do método científico nos séculos seguintes –, mas também sua imagem absolutamente dinâmica do planeta como uma massa de terra flutuando na água. Isso não difere muito da moderna concepção das placas tectônicas, exceto pelo fato de, na teoria de hoje, considerar-se que as massas de terra deslizam por uma camada plástica de rochas parcialmente derretidas.[73]

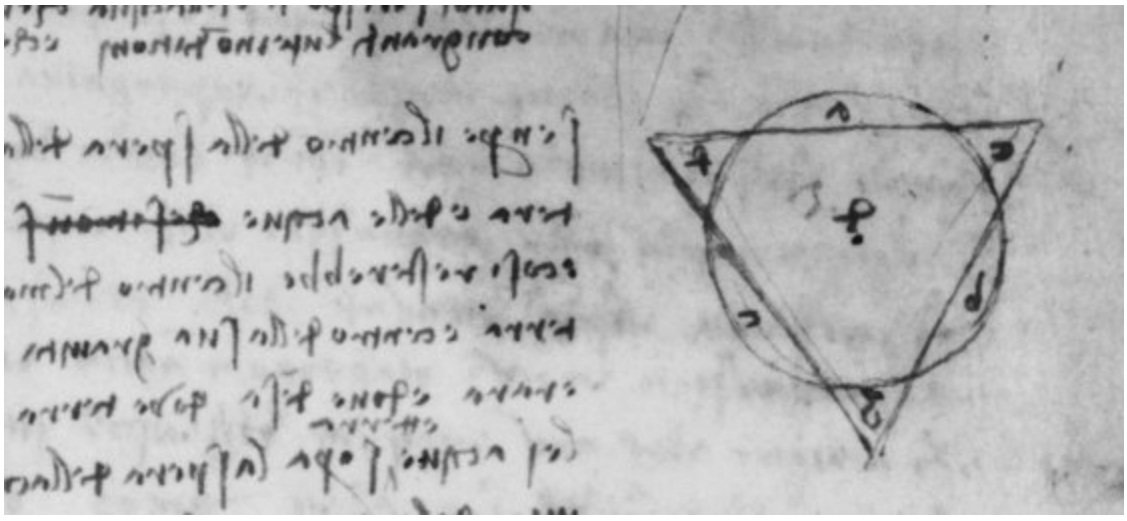


Figura 2-7: *Modelo geométrico da Terra, Codex Leicester, fólio 35v.*

Depois de ilustrar a relação dinâmica entre terra e água com seu modelo geométrico, Leonardo passa a discutir a forma real da Terra.[74] Explica que esta tem um centro geométrico, ao qual dá o nome de “centro do mundo”. Se a massa de terra fosse homogênea e igualmente distribuída,

constituiria uma esfera perfeita em volta do centro geométrico, o mesmo sucedendo à esfera de água que rodeia o elemento terra.

Na realidade, porém, a massa de terra nem de longe é homogênea. O interior do mundo, na visão de Leonardo, é um aglomerado complexo de terra e rochas sólidas, água que escorre por vários canais e vastas cavernas escavadas pela erosão. Devido a essa distribuição desigual de terra e água, um dos hemisférios da Terra sempre será mais pesado que o outro, de modo que o "centro de gravidade" da Terra não coincidirá com o "centro do mundo".[75] Dividindo a esfera horizontalmente, com o hemisfério mais pesado embaixo, Leonardo localiza o centro de gravidade sob o centro geométrico, dentro do hemisfério mais pesado.

No entanto, as posições relativas dos dois centros da Terra não são estáticas. Como no modelo da pirâmide terrestre imersa na esfera de água, as massas de terra do planeta podem mergulhar fundo na esfera de água ou dele emergir. A fim de explicar as forças que provocam esse movimento, Leonardo introduz um argumento aristotélico. Como organismo vivo, raciocina ele, a Terra se moverá naturalmente em direção a um estado de equilíbrio e se esforçará para aproximar seu centro de gravidade de seu centro geométrico.

Conforme notou Stephen Jay Gould, esse movimento lembra o de uma gangorra.[76] Assim como duas pessoas de pesos diferentes podem movimentar uma gangorra caso a mais pesada desça e a mais leve suba, assim as massas sólidas do hemisfério mais pesado irão gradualmente mergulhando rumo ao centro do mundo enquanto as rochas

do hemisfério mais leve se projetarem da água. Por isso, segundo Leonardo, camadas de rochas sedimentares emergem do mar para formar montanhas:

> Portanto, o lado mais leve da Terra é continuamente levantado, os antípodas se aproximam do centro e os antigos leitos do mar se tornam cadeias montanhosas.[77]

Na visão de Leonardo, a água molda continuamente as formas da Terra e, assim, a erosão é a causa maior da distribuição desigual da massa nos dois hemisférios. Para ele, a elevação das montanhas e sua erosão eram etapas diferentes do mesmo ciclo de transformações ocorridas durante enormes períodos de tempo geológico. No Codex Atlanticus, Leonardo observou que a elevação das montanhas é sempre seguida de sua erosão:

> Sustento que (...) as montanhas, esses ossos da Terra, penetraram com suas largas bases o ar e nele se ergueram, recobertas de várias camadas de solo. Depois, as chuvas frequentes e as cheias dos rios foram aos poucos lavando parte dos picos mais altos dessas montanhas, de modo que a rocha ficou exposta ao ar e a terra desapareceu.[78]

E, no Manuscrito F, ele explica como a erosão das montanhas, por sua vez, faz com que elas se ergam mais alto ainda:

> A Terra está sempre ficando mais leve em alguma parte e esta então se ergue, submergindo uma extensão da parte oposta suficiente para que ela junte (...) seu centro de gravidade ao centro do mundo.[79]

Hoje, o enorme ciclo de erosão, sedimentação, elevação e novamente erosão é conhecido pelos geólogos como ciclo rochoso.[80] A ideia era fundamental para a concepção de Leonardo de uma Terra dinâmica e em constante mudança –

um dos vários motivos pelos quais sua geologia parece tão moderna.

Além da erosão gradual das montanhas e de sua elevação paralela, igualmente gradual, a teoria tectônica de Leonardo inclui eventos ca tastróficos que ocorrem no interior da Terra. Desde a Antiguidade, acreditava-se que existissem numerosas veias de água no interior da Terra[81] e Leonardo supunha que essa água, com o tempo, havia escavado grandes cavernas subterrâneas. Com o avanço da erosão, as cavernas iriam se tornando cada vez mais instáveis. Partes da crosta terrestre desabariam então sobre elas e o movimento dessas formidáveis massas de rocha em direção ao centro do mundo tornaria mais leve o hemisfério superior, contribuindo assim para a elevação de suas montanhas. No Codex Leicester, Leonardo fornece uma descrição clara desse imaginário processo tectônico:

> Grande parte da abóbada do vasto espaço da Terra preenchido com água, ou seja, da imensa caverna, desabou em direção ao centro do mundo e foi deslocada pelos cursos de água subterrâneos que continuamente desgastam o lugar por onde passam (...). A grande massa ruiu (...) tornando a Terra mais leve naquele ponto; a seguir, essa parte da Terra imediatamente se deslocou do centro do mundo e se elevou às alturas onde vemos camadas de rochas produzidas pela ação ordenada das águas, nos picos das montanhas.[82]

O tema dos desabamentos catastróficos em cavernas subterrâneas foi retomado em séculos posteriores e discutido sob o nome de “catastrofismo” até o surgimento da teoria das placas tectônicas no século XX.[83] A moderna teoria das placas tectônicas fornece um quadro conceitual unificador para entendermos a composição, estrutura e processos internos da Terra.[84] Sua ideia fundamental é que a litosfera, a camada externa dura do planeta, compõe-se de

gigantescas placas que se movem sobre uma camada plástica de rochas parcialmente derretidas, chamadas pelos geólogos de astenosfera. Em seus limites, essas placas podem se afastar uma da outra, deslizar uma pela outra, afundar uma sob a outra ou colidir de frente uma com a outra. Essas interações extremamente lentas de placas maciças produzem as forças que geram, respectivamente, encrespamentos nos oceanos, terremotos, arcos insulares vulcânicos e cadeias de montanhas. As forças responsáveis pelos movimentos das placas decorrem dos fluxos de magma quente que circulam no manto da Terra, logo abaixo da litosfera. Os detalhes desses processos termodinâmicos ainda não são plenamente compreendidos.

Segundo a teoria tectônica de Leonardo, as grandes massas de terra flutuam na água e não no magma quente (elemento fogo). Ainda assim, os traços gerais de sua explicação da origem das montanhas têm muito em comum com a ideia moderna. Em ambos os casos, a elevação das montanhas é consequência de eventos catastróficos, com massas enormes de rocha se movendo pelo interior do planeta. E mesmo a concepção de Leonardo de massas de terra se erguendo lentamente da água ao tornar-se mais leves, a fim de manter terra e água em equilíbrio, tem seu equivalente na geologia moderna. Nos termos da chamada teoria isostática, partes da crosta superior que flutuam na camada de rochas derretidas sobem verticalmente quando ficam mais leves, tal como na teoria de Leonardo.[85] Os geólogos de hoje confirmaram, por exemplo, que a Europa setentrional ainda está se erguendo por causa desse ajustamento isostático, provocado pela fusão da capa de

gelo que cobria a região há milhões de anos. De novo, é impressionante constatar a presciência das concepções científicas de Leonardo, sobretudo quando dizem respeito a processos de grande porte que ocorrem em períodos de tempo imensamente longos.

O DISTANTE PASSADO GEOLÓGICO

Durante os anos 1502-1504, Leonardo viajou por toda a Toscana e Romanha a fim de implementar vários projetos militares e de engenharia hidráulica.[86] Desenhou belos e acurados mapas das regiões que visitou, enquanto empreendia amplos estudos de suas formações geológicas, observando-as e registrando-as com notável exatidão. "Todos, mas especialmente o geólogo de campo", afirma o historiador da geologia François Ellenberger, "apreciarão o valor inestimável dessas pesquisas e sua interpretação, cuja novidade e perspicácia nunca deixam de surpreender".[87]

Muitas dessas observações ocorreram na bacia do Arno, acima e abaixo de Florença. Numa anotação do Codex Leicester, por exemplo, Leonardo ressaltava:

> Perto de Monte Lupo, [o Arno] deixou depósitos de cascalho misturados, que formam uma massa compacta com diversos tipos de pedras de diferentes procedências, cores e dureza. Mais adiante, onde o rio se curva na direção de Castel Fiorentino, a areia se consolidou em tufo calcário. Um pouco abaixo dali, o rio depositou a lama na qual viveram conchas e que foi se erguendo em camadas, à medida que as águas do lodoso Arno iam se despejando nesse lago (...) conforme se vê no corte do Colle Gonzoli, rasgado e corroído na base pelo Arno.[88]

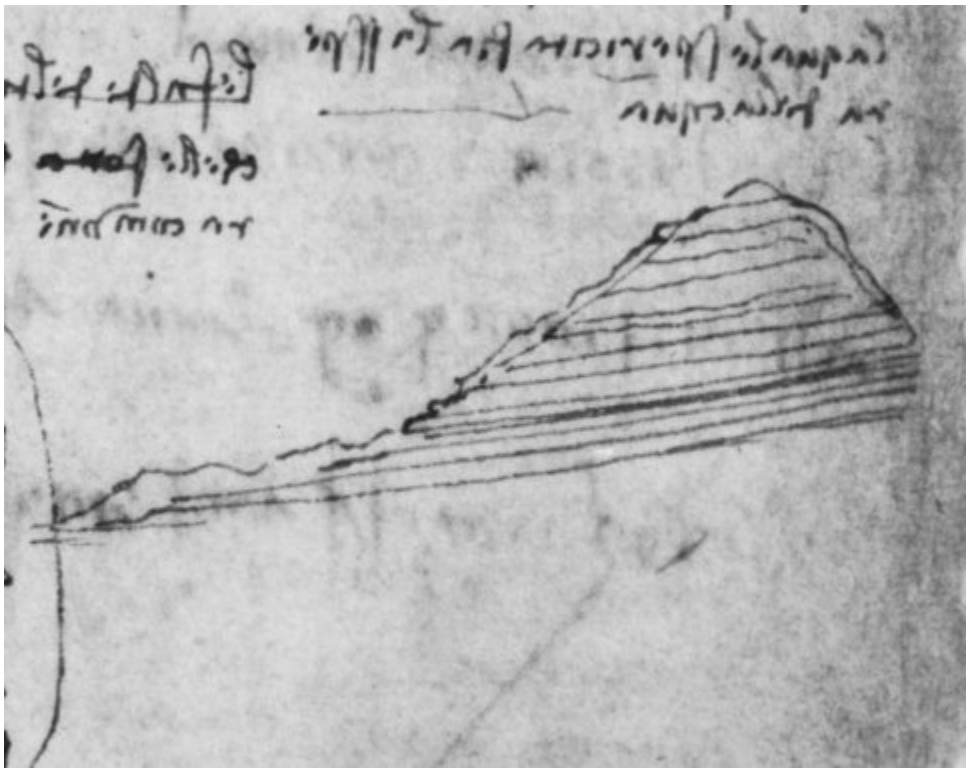


Figura 2-8: *Esboço de depósitos de argila ao pé de uma montanha de arenito formada por camadas horizontais, Codex Leicester, fólio 36r.*

Assim como mostrara as diferenças entre rochas ígneas e arenito em *A Virgem do Rochedo*, vinte anos antes, Leonardo agora percebia claramente as discrepâncias entre montanhas formadas por estratos de rocha dura (chamados hoje pelos geólogos de turbiditos) e camadas de argila, cheias de fósseis, na base dessas montanhas. Um esboço no Codex Leicester (Fig. 2-8) ilustra a diferença entre esses dois tipos de sedimentos, que datam de diferentes períodos geológicos: depósitos de argila ao pé de uma montanha formada por camadas horizontais e bem mais antigas de turbiditos.

Leonardo utilizou suas observações no vale do Arno para especular a respeito da história geológica daquela depressão. Sabia desde a in fância que abaixo de Florença,

perto de Vinci, a planície do Arno é cortada transversalmente por uma cadeia de colinas, os montes Albano e Gonfolina; assim, supôs que no passado distante as depressões de Florença e de Arezzo, rio acima, eram os sítios de dois lagos gigantes e de níveis diferentes:

> No grande vale do Arno, acima de Gonfolina, uma rocha está unida desde a Antiguidade ao monte Albano sob a forma de um penhasco muito alto. Isso manteve o rio contido a tal ponto que, antes de poder se esvaziar no mar (...) formou dois grandes lagos, o primeiro dos quais existiu onde hoje vemos a cidade de Florença prosperar juntamente com Prato e Pistoia (...). Na parte superior do Val d'Arno, em Arezzo, formou-se um segundo lago, que enviava suas águas para o outro já mencionado.[89]

Nos anos que se seguiram, a imagem de dois lagos de montanhas interligados, correndo um para o outro, tornou-se uma importante metáfora visual nas pinturas de Leonardo, ilustrando os fluxos e transformações contínuas que moldaram a superfície da Terra durante longos períodos de tempo geológico. Esses lagos são claramente visíveis no segundo plano de suas pinturas da maturidade, como a *Mona Lisa* e a *Virgem e o Menino com Santa Ana*.[90] Em ambos os quadros, Leonardo revela sua visão do distante passado geológico – as formas da Terra em incessante movimento e transformação. Quando as montanhas se ergueram do oceano primitivo, surgiram bolsões de mares interiores e lagos que por fim encontraram o caminho de volta para o oceano, com suas águas abrindo estreitas gargantas nas montanhas e colinas. Gradualmente, essas águas escavariam vales e depositariam neles massas de cascalho e areia que, no futuro, se tornariam solo fértil. Em suma, as míticas formações rochosas nessas duas obras-

primas da pintura representam as meditações de Leonardo sobre o nascimento da Terra viva.

CAPÍTULO 3

O crescimento das plantas

A ciência de Leonardo, como já vimos, era uma ciência de formas vivas que estão sendo continuamente trabalhadas por processos subjacentes – quer estudasse rochas e sedimentos da Terra, moldados pela água, ou formas orgânicas de plantas, animais e seres humanos, moldadas por seu metabolismo. Invariavelmente, ele começava pela aparência exterior dessas formas vivas e só depois passava a investigar sua natureza intrínseca. Assim, no centro dos estudos botânicos de Leonardo, encontramos os dois grandes temas que reaparecem sempre em outros ramos de sua ciência: as formas orgânicas da natureza, e os padrões de metabolismo e crescimento nelas implícitos.

O destacado trabalho de Leonardo em botânica, bem como suas contribuições originais ao desenho de paisagens e jardins, são discutidos pormenorizadamente no magnífico livro *Leonardo da Vinci on Plants and Gardens*, do botânico William Emboden.[1] À sua análise muito deve este capítulo.[2]

Ao contrário da maioria dos outros estudos científicos, os trabalhos de Leonardo em botânica foram iniciados relativamente tarde em sua vida.[3] Nos primeiros anos, os

desenhos de plantas e árvores eram feitos sobretudo como estudos de pintura. Notas sobre plantas e paisagens, muitas vezes tratando de cores e luz além da exatidão botânica, aparecem em seus manuscritos com mais frequência depois de 1500, quando ele já tinha 50 anos de idade. A habilidade dos esboços botânicos atingiu a perfeição máxima por volta de 1508-1510 – e somente após 1510, quando ele já era sexagenário, seus textos botânicos se transformaram em pesquisas puramente científicas, sem relação com a pintura.

As plantas eram frequentemente usadas pelos pintores renascentistas para decorar os espaços geométricos e abstratos típicos dos quadros da época, sobretudo na escola florentina. Elas apareciam quase sempre em arranjos formais: algumas realistas, outras puramente imaginárias. A célebre *Primavera* de Botticelli, por exemplo, mostra uma complicada alegoria num cenário de jardim com exuberante abundância de flores. Segundo Emboden, "é possível identificar trinta das quarenta espécies de plantas e algumas estão pintadas fielmente. Outras são fantasiosas e parecem ter sido incluídas por seu mero valor decorativo".[4]

Afora a decoração, inúmeras plantas serviam, na Renascença, a outra importante finalidade, principalmente nos quadros religiosos. Eram muitas vezes associadas a histórias religiosas bem conhecidas do povo e tinham, assim, a função "iconográfica" de transmitir significado por intermédio de imagens simbólicas. Leonardo explorou essas camadas adicionais de significado em diversas pinturas, mostrando plantas simbólicas com a máxima exatidão botânica e um tratamento magistral de luz e sombra.

Além disso, teve o cuidado de representar as plantas em seu ambiente próprio e com fidelidade sazonal – a tal ponto que um botânico moderno pode reconhecer, por exemplo, o cenário de *A Virgem do Ro - chedo* como uma paisagem toscana entre março e abril.[5] Essas características é que tornam únicas as plantas nas obras-primas de Leonardo. Nas palavras de Emboden:

> Livre das definições formais que caracterizam Mantegna, Ghirlandaio, Perugino e Botticelli no emprego de motivos de plantas, Leonardo introduziu uma enorme vitalidade em suas figurações botânicas. Para além do uso iconográfico das plantas, [ele] levava em conta o contexto ecológico, a correção sazonal e a fidelidade botânica (...). Os ambientes dramáticos de Leonardo parecem carregados e permeados de unidade orgânica.[6]

MOVIMENTO ESPIRAL

Quando investigava “todas as formas da natureza” nos diversos ramos de sua ciência, Leonardo sempre buscava os processos e padrões de organização que porventura tivessem em comum. Um padrão em particular que o fascinou a vida inteira foi o movimento espiral (*moto elico*). Conforme já mencionamos, Leonardo via a forma espiral como um código arquetípico para a natureza sempre mutável e no entanto estável das formas vivas.[7] Observou-a incansavelmente, desenhando-a depois, nos vórtices de água e ar, nos padrões de crescimento das plantas e animais, nos cabelos encaracolados, nos movimentos e gestos humanos.

Em seus desenhos botânicos, Leonardo às vezes colocava folhagens espiraladas estilizadas a fim de exprimir seu forte senso da natureza dinâmica das formas orgânicas. Fez isso desde muito cedo; na verdade, esse hábito é

evidente em um de seus primeiros desenhos botânicos que chegaram até nós.

Figura 3-1: *Andrea del Verrocchio e Leonardo da Vinci, "Estudo para a Giostra", (C 1475), Galleria degli Uffizi, Florença, Itália, Gabinetto di Disegni e Stampe.*

Por volta de 1475, quando Leonardo acabara de receber o certifi - cado de mestre-pintor, mas ainda trabalhava na *bottega* de Verrocchio, seu professor ajudou-o no esboço prévio de um estandarte de torneio triangular feito de linho, onde se via um Cupido alado e uma ninfa reclinada (Fig. 3-1). O estandarte, encomendado pela família Medici, seria exibido numa suntuosa representação teatral antes de uma justa (*giostra*) em 1475 e o desenho, hoje na Galleria degli Uffizi, em Florença, é conhecido como "Estudo para a *Giostra*". Sua origem e autoria foram objeto de longa controvérsia, mas hoje os estudiosos concordam em que

Verrocchio fez um esboço prévio com giz preto, mal visível no original, e deixou Leonardo completá-lo com pena e tinta.[8] Ciente do talento especial do discípulo para reproduzir formas naturais, ele confiou também o desenho da paisagem inteira a Leonardo, que acrescentou as plantas e a saliência rochosa onde a ninfa está recostada.

As plantas de caules compridos de onde Cupido emerge são reproduzidas com tamanha exatidão que os botânicos as reconheceram como uma espécie de grama alta, conhecida como painço-vassoura (*Panicum miliaceum*). No entanto, Leonardo preferiu dar às folhas mais baixas um movimento espiralado que não é característico da planta. Essa forma espiral das folhas foi uma criação original do jovem Leonardo, sem precedentes na arte renascentista.[9] Acredita-se que, desde o início da carreira, Leonardo tenha encarado os padrões de crescimento das plantas como manifestações de um padrão mais geral corporificado em várias formas de vida orgânica.

Dez anos depois, a folhagem espiralada estilizada reaparecia na primeira obra que Leonardo completou, *A Virgem do Rochedo* (Gravura 3), que contém todo um ecossistema de plantas sutilmente reproduzidas. No canto esquerdo inferior, ele pintou uma espécie alta de íris chamada íris-amarela (*Iris pseudacorus*), mostrando com exatidão suas flores características e suas folhas planas, laminares. Todavia, se na natureza essas folhas brotam do chão em forma de leque e num único plano, Leonardo introduziu na folhagem um movimento em espiral que lembra muito o do painço-vassoura, pintado na juventude. Nessa obra-prima, hoje no Louvre, a forma espiralada das

folhas inferiores da planta é bem mais pronunciada, transmitindo não apenas um forte senso de crescimento e vitalidade, mas também uma impressão de extrema elegância.

Figura 3-2: *Estudo para Leda e o Cisne, c. 1506-1508, Boymans van Beuningen Museum, Rotterdam.*

Os desenhos de Leonardo de folhagens espiraladas atingiram o clímax por volta de 1506-1508, nos estudos para *Leda e o Cisne*, em que o tema central do artista era o mistério da força de procriação da vida.[10] Um esboço

preliminar, hoje na Rotterdam Collection, mostra-nos uma mulher nua, sensual, de joelhos num pântano e voltando-se para o cisne a seu lado com um gesto de grande ternura (Fig. 3-2). Essa composição prenhe de erotismo é realçada pela tabua (*Typha latifolia*) fálica recortada contra o céu e pelo capim retorcido aos pés da jovem. O movimento em espiral do corpo de Leda repete-se no cisne e na folhagem ao redor de ambos, simbolizando a abundância das forças geradoras de vida.[11]

Figura 3-3: *Estudo da cabeça de Leda (detalhe), c. 1505-1510, Estudo da figura, perfil e caricatura da Coleção Windsor, RL 12516.*

Leonardo fez vários estudos de plantas de brejo em preparação para *Leda e o Cisne*, inclusive o famoso desenho da Estrela de Belém (*Ornithogalum umbellatum*, Gravura 2), a espécie que os botânicos identificaram como a grama aos pés de Leda no estudo de Rotterdam. A folhagem, nesse desenho altamente estilizado, descreve as mais exageradas espirais. Com efeito, a composição toda lembra muito um vórtice de água, outra das formas vivas arquetípicas do artista. No mesmo período, Leonardo produziu também um estudo para a cabeça de Leda (Fig. 3-3) em que o mesmo movimento em espiral aparece no cabelo – mais uma manifestação da espiral como símbolo da fecundidade e do poder procriador da natureza.

"MUITAS FLORES PINTADAS COM REALISMO"

Plantas e árvores desempenham papéis importantes em praticamente todas as pinturas de Leonardo. Têm significados simbólicos e transmitem mensagens metafóricas, ao mesmo tempo que exibem um profundo conhecimento de formas botânicas e seus processos essenciais. As flores parecem ter sido o primeiro tema de Leonardo quando começou a revelar grande talento para o desenho, ainda criança, em sua Vinci nativa. Nos cadernos de notas, anos depois, ele catalogou "muitas flores pintadas com realismo" entre as obras que produziu no início da juventude.[12]

A sofisticada visão botânica e ecológica de Leonardo aparece numa de suas primeiras obras-primas, *A Virgem do Rochedo* (Gravura 3). Como já vimos, a pintura foi chamada

de “um *tour de force* geológico” por causa da representação notavelmente exata de formações geológicas complexas.[13] Poderia ser chamada também de “um *tour de force* botânico” pela mesma razão. As plantas luxuriantes que enchem a gruta rochosa não estão espalhadas pelo quadro num padrão decorativo, mas são mostradas crescendo apenas em lugares onde o arenito desgastado se decompôs suficientemente para permitir que suas raízes se fixassem.[14] Apenas espécies próprias ao ambiente úmido da gruta foram pintadas, cada qual em seu *habitat* e etapa sazonalmente exata de desenvolvimento.[15]

Dentro dessas limitações botânicas e ecológicas, Leonardo selecionou plantas específicas que evocassem para seus contemporâneos múltiplas camadas de significados simbólicos sutis, associados aos temas religiosos da composição.[16] Atrás do ombro esquerdo da Virgem está uma graciosa aquilégia esporinha *(Aquilegia vulgaris*). Seu nome latino deriva de *aquila* (“águia”), já que suas flores lembram as garras dessa ave. Na Antiguidade, era conhecida também como “erva de leão” e seu nome vulgar em inglês, *columbine*, alude à semelhança da flor com uma revoada de pombos. Para a mentalidade renascentista, essas associações eram ricas de simbolismo religioso. A águia e o leão simbolizavam os evangelistas João e Marcos, o pombo personificava o Espírito Santo e as folhas tripartidas da aquilégia eram uma imagem perfeita da Trindade.

Logo acima da mão esquerda da Virgem, entrevemos uma moita de minúsculos turbilhões formados pelas folhas de uma planta conhecida como erva-coalheira (*Galium*

verum). Segundo a lenda, José improvisou com a palha seca dessa planta, na manjedoura, uma cama para Maria e seus botões brancos assumiram um radiante tom dourado quando Jesus nasceu.

A roseta de folhas acima do joelho do Menino Jesus foi identificada por Emboden como da prímula (*Primula vulgaris*), considerada um emblema de virtude por causa de suas flores muito brancas. Emboden assinala que a pureza de Cristo era geralmente representada por uma rosa branca, mas que Leonardo preferiu a prímula branca porque uma rosa não seria apropriada ao cenário e à estação.

Várias plantas, no quadro, aludem a diversas etapas da Paixão de Cristo. As folhas de palmeira, acima de São João menino, identificadas como do gênero *Raphis*, eram um símbolo antigo de imortalidade e, evidentemente, pretendem aqui anunciar a entrada triunfal de Jesus em Jerusalém, assim como São João anunciaria Cristo como o Messias. Os três ramalhetes de flores atrás de São João podem pertencer a várias espécies de plantas. No entanto, em vista da estação implícita do ano, foram identificadas por Emboden como a anêmona conhecida, por causa de suas folhas trifoliadas, pelo nome de “erva da trindade” (*Anemone hepatica*). Outro ramalhete pequeno de anêmonas (*Anemone hortensis*) pode ser visto sob o Menino Jesus sentado. As anêmonas representavam as gotas de sangue de Cristo e dizia-se que haviam florescido sob a cruz no Calvário quando o sangue escorreu das feridas do Salvador. Finalmente, a ressurreição é simbolizada pelas folhas de acanto (*Acanthus mollis*), entre o joelho direito e o calcanhar esquerdo de São João. Conforme explica

Emboden, era tradição na Itália plantar folhas de acanto em cima de túmulos e essa planta passou a simbolizar a ressurreição de Cristo porque murcha no outono e refloresce rapidamente na primavera com uma profusão de folhagem verde.

Já mencionamos a íris elegante no canto inferior esquerdo do quadro, com suas curiosas folhas espiraladas.[17] Emboden ressalta que essa não é a espécie *Iris florentina*, que Leonardo mostrou muitas vezes em seus desenhos, e sim a *Iris pseudacorus*, mais ecologicamente apropriada ao ambiente úmido.[18]

Há muitas outras espécies de plantas em *A Virgem do Rochedo*, todas escolhidas por uma determinada significação simbólica. Incluem o hipericão (*Hypericum perforatum*), a planta consagrada a São João e, segundo se crê, dotada de virtudes protetoras; o cíclame (*Cyclamen purpurascens*), que simboliza o amor e a devoção por causa de suas folhas em forma de coração; várias espécies de samambaias, tidas como benevolentes repositórios de almas; e ramos de carvalho (*Quercus robur*), que incorpora uma série de valores iconográficos.

Como vimos, há duas versões de *A Virgem do Rochedo*, uma no Louvre e a outra, pintada vários anos depois, na National Gallery de Londres.[19] É quase consensual que Leonardo deixou seu colega pintor Ambrogio de Predis executar boa parte da versão londrina, o que, como já mencionamos, parece confirmado por uma comparação entre os detalhes geológicos dos dois quadros.[20]

O botânico William Emboden chegou a uma conclusão parecida depois de comparar detalhes de plantas nas duas

obras. Ele assinala que há menos espécies na versão londrina e demonstra que muitas são pintadas de modo pouco fiel, sem a sofisticação exibida pela versão do Louvre. Isso o levou a concluir que, na versão londrina, “com quase certeza a vida vegetal não é da lavra de Leonardo (...). É impossível crer que o pintor responsável, na versão de Paris, por tamanha fidelidade ao reproduzir plantas com exatidão ecológica e sazonal, para não mencionar a iconografia, seja o mesmo que tenha produzido [na versão londrina] uma paisagem tão precária, repleta de convenções simplistas da apresentação botânica”.[21]

BOTÂNICA PARA PINTORES

No início da carreira, Leonardo desenhou plantas individuais principalmente como estudos para pinturas. Mais tarde, também anotou nos cadernos de notas instruções para pintores sobre a maneira de captar os efeitos de luz e sombra, bem como a diversidade de cores que observava na natureza. Essas notas sobre como pintar plantas e árvores foram ficando cada vez mais frequentes a partir de 1500. Elas acabaram reunidas na coletânea clássica de escritos de Leonardo, feita por Jean-Paul Richter, numa seção intitulada “Botânica para Pintores”.[22] Os trechos escolhidos, que enchem quase quarenta páginas, contêm descrições detalhadas de variações cromáticas sutis e de efeitos de luz e sombra em várias partes de árvores e plantas. No Codex Arundel, por exemplo, Leonardo escreve:

> As árvores numa paisagem são de diversos tons de verde, com muitas tendendo para o preto, como os abetos, os pinheiros, os ciprestes, os loureiros etc. Algumas pendem para o amarelo, como as nogueiras, as

> pereiras, as videiras e as hortaliças. E outras são ao mesmo tempo amareladas e escuras, como os castanheiros e os carvalhos comuns.[23]

E, no Manuscrito G:

> As plantas novas têm folhas mais transparentes e uma casca mais lustrosa do que as velhas; em especial, a nogueira é mais clara em maio do que em setembro.[24]

Leonardo era, com efeito, um mestre em se tratando de captar a aparência de árvores sob as mais diversas condições de luminosidade. Nas palavras de Emboden, elas manifestam "uma qualidade mística onipresente, transmitida pela justaposição de luz e sombra".[25] Uma folha de papel da Coleção Collection (Fig. 3-4) traz um exemplo particularmente elegante de uma única árvore desenhada a giz vermelho, na qual esses efeitos ópticos sutis são soberbamente captados. A legenda de Leonardo explica:

> A parte da árvore que fica contra a sombra é toda de um tom só; e onde ela ou seus galhos são mais grossos, surge mais escura porque ali a impressão da luz é menor. Entretanto, se os galhos se antepõem a outros, nesse lugar as partes luminosas são mais brilhantes e as folhas refletem a luz do sol.[26]

Só alguns dos primeiros estudos que Leonardo fez de plantas individuais chegaram até nós. Um dos melhores, e talvez o mais famoso, é o do lírio (*Lilium candidum*), do início dos anos 1470 (Fig. 3-5). Essa flor é da mesma espécie da que o anjo segura na *Anunciação* (Galleria degli Uffizi), mas difere dela pela disposição das flores, botões e folhas. O estudo é um sólido testemunho da incomparável maestria de Leonardo no desenho botânico, ainda no início dos seus 20 anos. A reprodução dos seis estames do lírio, de seu invólucro com seis pétalas e da disposição das folhas no caule (que os botânicos chamam de filotaxia) é

absolutamente correta. “Esse lírio”, escreve Emboden, “é uma obra-prima das imagens botânicas em todos os detalhes”.[27]

Figura 3-4: *Estudo de árvore, c. 1508, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 8v.*

Leonardo sem dúvida produziu muito mais estudos de flores e plantas do que temos conhecimento, para pintar *A Virgem do Rochedo, Leda* e o complicado entrelaçamento de

folhagens luxuriantes que cobre a abóbada e o teto da *Sala delle Asse* [Salão das Tábuas de Madeira] no Castelo Sforza, em Milão.[28] De fato, a historiadora da arte Jane Roberts estima que várias centenas de estudos de plantas e flores, feitos por ele, se perderam.[29]

O ponto alto dos estudos de plantas de Leonardo são os desenhos que produziu por volta de 1508-1510. Conforme explica Emboden, a qualidade especial dessas obras é que elas se afastam nitidamente dos primeiros esboços do artista para suas pinturas e assumem as características de ilustrações científicas independentes.[30] Por exemplo, o desenho de uma anêmona (*Anemone nemerosa*) e de uma tagetes do brejo (*Caltha palustris*), na Coleção Windsor (Fig. 3-6), é um hábil estudo botânico comparativo em que as flores das duas espécies são parecidas, mas as formas das flores são diferentes. No fólio seguinte (Fig. 3-7), um bunho (*Scirpus lacustris*) é contrastado com uma junça (*Cyperus monti*). Ambas são plantas de brejo e se parecem muito, mas pertencem a famílias distintas. Na legenda, Leonardo observa as diferenças entre as duas, ressaltando em particular a angulosidade do caule da junça.

Figura 3-5: *Lírio, c. 1472-1475, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 2r.*

A transição dos desenhos de Leonardo, de estudos preparatórios de pinturas para ilustrações científicas, foi acompanhada por uma série de textos que representam suas primeiras pesquisas puramente científicas da natureza das formas e processos botânicos. Para avaliar o significado dessa evolução no pensamento de Leonardo, precisamos antes fazer uma ideia da história da botânica desde a

Antiguidade, pois ela proporcionou o contexto intelectual em que ele se desenvolveu.

A BOTÂNICA DA ANTIGUIDADE AO RENASCIMENTO

Na Antiguidade e nos séculos que se seguiram, o estudo do mundo vivo era conhecido como “história natural” e seus cultores, como “naturalistas”.[31] As ideias dos antigos sobre plantas e animais foram recolhidas com profusão de detalhes nas obras enciclopédicas de quatro mestres – Aristóteles, Teofrasto, Plínio, o Velho, e Dioscórides –, todas disponíveis para os humanistas italianos em edições impressas em grego ou latim.

Figura 3-6: *Anêmona (dir.) e tagetes (esq.), c. 1506-1508, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 23.*

Aristóteles foi o autor clássico mais conhecido dos estudiosos da Renascença. Suas numerosas obras incluíam diversos tratados sobre animais, como a *Historia Animalium* (“História dos Animais”). Se Aristóteles observou menos judiciosamente as plantas que os animais, seu discípulo e sucessor Teofrasto pode ser considerado um botânico dos mais argutos. O tratado *De Historia Plantarum* (“História das Plantas”) foi um trabalho pioneiro que valeu ao autor o título de “Pai da Botânica”. Entretanto, embora Teofrasto se destacasse nas categorias botânicas, sua botânica em si permaneceu puramente descritiva. Ele não indagava das causas primeiras e suas discussões a respeito das influências ambientais eram eventuais e falhas. “Teofrasto foi uma grande figura em seu tempo”, comenta Emboden, “mas não devemos compará-lo a nenhum botânico da Renascença, [muito menos] a Leonardo da Vinci”.[32]

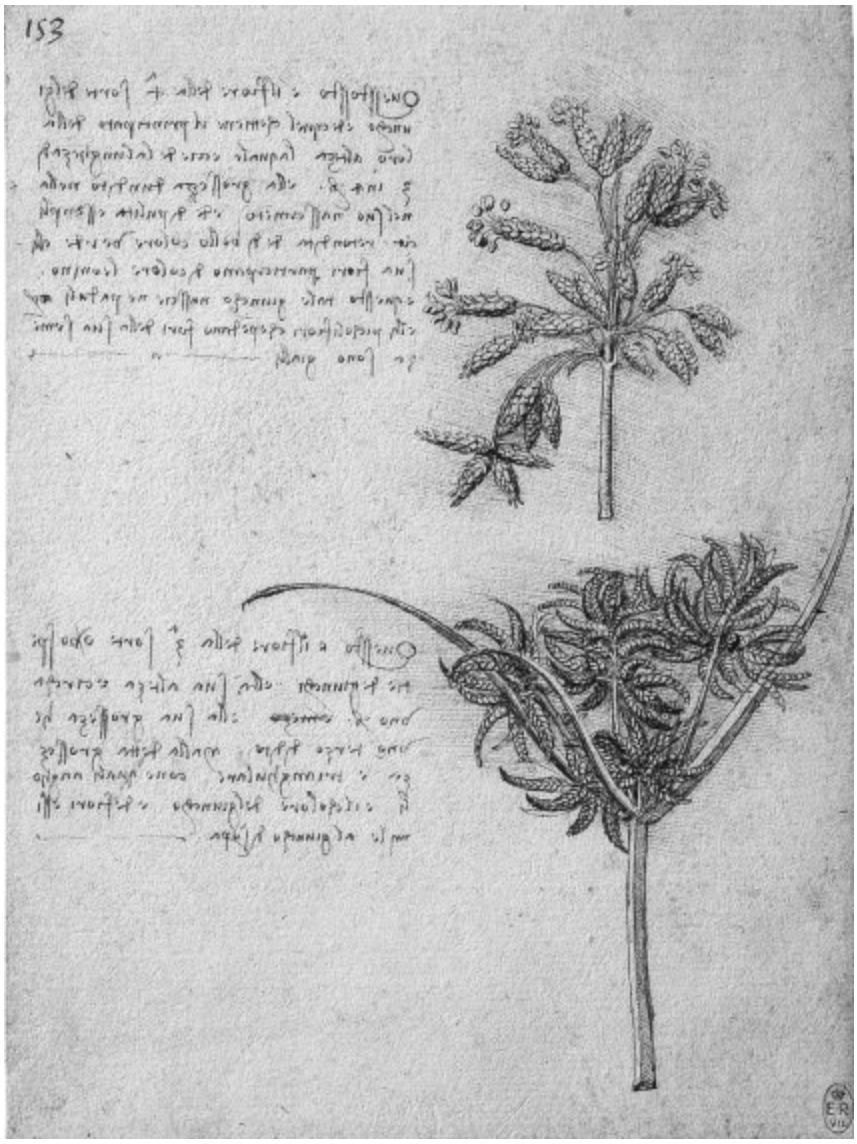


Figura 3-7: *Estudo que contrasta um bunho (no alto) com uma junça (embaixo), c. 1510, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 24.*

No século I d.C., o naturalista romano Plínio, o Velho (Caio Plínio) redigiu uma monumental enciclopédia intitulada *Historia Naturalis* (“História Natural”), em 37 volumes, que se tornou o manual científico favorito na Idade Média e no Renascimento. Nesse alentado compêndio, Plínio mencionou mais de mil plantas, número que não seria igualado em livro algum até a época renascentista. Todavia,

segundo Emboden, “não há nenhum indício de compreensão ou indagação” nesses incontáveis verbetes.[33]

Nos séculos seguintes, a botânica foi quase sempre considerada um ramo secundário da medicina, dado que as plantas eram estudadas sobretudo para uso nas artes terapêuticas. Por muito tempo, o texto de maior prestígio nesse campo foi *Materia Medica*, do médico grego Dioscórides, contemporâneo de Plínio. Continha referências a seiscentas espécies de plantas dispostas em três categorias: aromáticas, alimentícias e medicinais. A obra foi logo traduzida para o latim e o árabe, em edições às vezes maravilhosamente ilustradas. Um belo exemplo é a edição conhecida como Codex Juliana, do nome da filha de um imperador romano a quem foi dada de presente. Um fac-símile quase perfeito pode ser visto na Biblioteca Nacional de Viena e por ele se constata que o manuscrito é um dos mais magnificamente ilustrados da história.

Materia Medica permaneceu a única autoridade entre os médicos até a Renascença. Nenhuma droga era considerada eficaz se ali não fosse mencionada. Esse uso doutrinário bloqueou em muito o pensamento botânico original e transformou a botânica numa disciplina quase exclusivamente a serviço da medicina. Até o século XVI, as plantas não eram pesquisadas como entidades em si mesmas, mas apenas como acessórios das artes terapêuticas. Os únicos outros escritos sobre plantas tratavam de seu emprego culinário ou de seu papel como elementos decorativos de jardins.

Entre os poucos botânicos independentes da Idade Média, destaca-se a abadessa Hildegard von Bingen, uma

extraordinária mística e polímata do século XII que escreveu tratados teológicos, textos botânicos e médicos, canções litúrgicas e poemas visionários, além de enriquecer manuscritos com soberbas iluminuras. Dois de seus livros tratam de plantas da região de Bingen. Contêm descrições originais de setenta espécies, todas identificadas pelos nomes alemães e discutidas em relação com a medicina.[34]

Outro botânico medieval importante foi o filósofo escolástico alemão Alberto Magno (Albert, Graf von Bollstadt), que viveu cerca de cem anos depois de Hildegard. Alberto coletou suas observações botânicas num volume intitulado *De Vegetabilibus* ("Sobre as Plantas"), que contém diversas teses originais e passou a ser considerado o livro mais importante de botânica desde Teofrasto. "Como observador da natureza, morfologista e precursor da maneira correta de se raciocinar em ciência", afirma Emboden, "Alberto não tem igual até chegarmos a Leonardo".[35]

O século XV foi a época dos herbários renascentistas – livros de botânica com descrições e ilustrações de ervas, plantas e suas propriedades clínicas. Graças à imprensa recém-inventada, numerosos exemplares de textos padronizados puderam ser produzidos, com o uso de xilogravuras e placas de cobre permitindo pela primeira vez a reprodução fiel de ilustrações.[36] Logo um grande número de herbários, inspirados no *Materia Medica*, saíram das prensas da Europa inteira e se tornaram extremamente populares. Muitos deles, no século XV, tiveram várias edições, não raro com títulos diferentes. Assim, uma única obra pode ser conhecida por vários nomes, o que causou

enorme confusão entre os historiadores da botânica e da medicina.[37]

A erudição que transparece na maioria desses herbários é falha.[38] Seu principal objetivo era mostrar exemplos locais de drogas medicinais citadas nos textos clássicos e as identificações errôneas são muito comuns. Aos compiladores não ocorria que espécies de plantas encontradas, digamos, no Mediterrâneo talvez não fossem as mesmas da Europa setentrional. Se uma planta não podia ser identificada pelo fato de não crescer em sua região, eles providenciavam a gravura de outra mais ou menos parecida e atribuíam-lhe as propriedades curativas mencionadas no manuscrito do qual seu livro derivava. Quase todos os herbários do início da Renascença eram enfadonhos e repetitivos, já que haviam sido copiados uns dos outros desde a Antiguidade, mas não da natureza.

LEONARDO, O BOTÂNICO

No início do século XVI, quando Leonardo passou a empreender estudos botânicos mais avançados, a botânica estava ainda numa fase puramente descritiva e era considerada mero acessório das artes terapêuticas. Mesmo nas grandes universidades de Pisa e Pádua, que tinham entre seus professores alguns dos melhores botânicos da época, não se ensinava nenhuma botânica genuína na qual as plantas fossem estudadas independentemente.

Como em tantos outros campos, Leonardo levou sua obra científica em botânica muito além da de seus contemporâneos. E, como os humanistas da época, estava

bastante familiarizado com os textos dos naturalistas clássicos, mas se recusava a repetir servilmente seus ensinamentos.[39] Na verdade, desprezava os estudiosos conservadores que apenas citavam os clássicos latinos e gregos. “Eles se pavoneiam”, escreveu desdenhosamente, “adornados com os trabalhos de outros, não com os seus próprios”.[40] Leonardo sempre estudou atentamente os textos clássicos para depois pô-los à prova comparando-os ponto por ponto com suas observações diretas da natureza.

Ao contrário dos contemporâneos, não apenas pintava plantas com exatidão como procurava entender as forças e processos por trás de suas formas. Nesses estudos, muitas vezes baseados em observações surpreendentes para sua época, tornou-se um pioneiro da botânica como ciência de direito próprio. Emboden encerra sua extensa análise do *corpus* das ideias botânicas de Leonardo com a seguinte afirmação:

> Como um todo, as argutas observações desse grande “discípulo da natureza” asseguram-lhe o posto de um dos maiores pensadores da botânica e de um homem muito à frente de seu tempo. A botânica, como ciência descritiva, foi introduzida por Leonardo em esferas de pensamento típicas do final do século XVII e mesmo na esfera de alguns conceitos do século XX.[41]

As notas botânicas de Leonardo estão espalhadas pelos Códices e, além disso, há uma longa seção sobre o assunto na Sexta Parte do *Tratado de Pintura*, a famosa antologia compilada após a morte do artista por um de seus discípulos, Francesco Melzi.[42] Como notaram Emboden e outros historiadores, menos de metade do material constante do *Trattato* pode ser encontrado entre os manuscritos remanescentes de Leonardo, indicando que

partes substanciais de seus escritos sobre botânica se perderam. De fato, Carlo Pedretti, especialista em Leonardo, concluiu a partir de sua extensa análise da cronologia do *Trattato* que Melzi deve ter copiado as seções botânicas de um manuscrito de Leonardo hoje perdido.[43]

Emboden assinala também que a apresentação e a notação botânica que aparecem no desenho do bunho e da junça sugerem uma folha destacada de um tratado sobre plantas. E Pedretti aventa que Leonardo pode ter se referido a esse tratado em outra folha da Coleção Windsor, onde menciona um planejado "discurso sobre as ervas".[44] O formato do manuscrito talvez tenha sido o de um manual clássico, mas seu conteúdo sem dúvida ia além do que se encontrava nos herbários tradicionais. "Parece", escreve Emboden, "que Leonardo tencionava escrever, ou escreveu, um tratado a fim de explicar todos os aspectos do crescimento das plantas conhecidas por ele".[45] Um livro desses estaria bem à frente de seu tempo. Os primeiros estudos de plantas como assunto independente só foram escritos séculos depois.

No centro da teoria botânica de Leonardo encontramos, como já foi dito, os dois grandes temas que também aparecem em outros ramos de sua ciência – as formas e padrões orgânicos da natureza e os processos de metabolismo e crescimento que os regem. Nos séculos seguintes, as pesquisas desses dois temas deram origem a dois ramos importantes da botânica moderna, a morfologia e a fisiologia vegetal. O termo "morfologia" foi cunhado no século XVIII pelo poeta e cientista alemão Johann Wolfgang von Goethe; seu objeto, o estudo da forma biológica,

tornou-se uma das metas principais dos biólogos no final do século XVIII e início do século XIX.[46] O progresso da fisiologia vegetal ocorreu graças aos grandes avanços na química durante o século XVIII. Um século depois, o aperfeiçoamento do microscópio abriu caminho para um novo ramo da botânica, a anatomia vegetal, dedicada ao estudo das partes e estruturas das plantas, inclusive traços invisíveis a olho nu. A anatomia vegetal expandiu-se depois por todos os campos da biologia, sem exceção da biologia molecular e da genética.

O desenvolvimento desses ramos da botânica durante os três últimos séculos reflete uma tensão presente na ciência e na filosofia ocidental desde os seus começos.[47] É a tensão entre o estudo da matéria (ou substância, estrutura, quantidade) e o estudo da forma (ou padrão, ordem, qualidade). O estudo da matéria foi empreendido por Demócrito, Galileu, Descartes e Newton; o da forma, por Pitágoras, Aristóteles, Kant e Goethe. Leonardo seguiu claramente a tradição de Pitágoras e Aristóteles ao elaborar uma ciência das formas vivas com seus padrões de organização, seus processos de crescimento e mudança. Graças a essa ciência, Leonardo se tornou um dos primeiros precursores de dois dos principais ramos da botânica, a morfologia e a fisiologia vegetal.

Em seus estudos morfológicos, como veremos adiante em maiores detalhes, Leonardo examinou e registrou diversos padrões de crescimento e ramificação de flores e árvores. Notou, sobretudo, diferentes arranjos de galhos e folhas em volta do caule – um campo de estudo conhecido hoje como filotaxia. No âmbito da fisiologia, interessou-se

especialmente pela nutrição das plantas devida à luz do sol e à água, bem como pelo transporte da "seiva vital" (açúcares e hormônios, na linguagem moderna) através dos tecidos das plantas. Distinguiu perfeitamente entre os dois tipos de tecidos vasculares, que hoje chamamos de floema e xilema, e fez percucientes observações sobre os movimentos da seiva quando a árvore é ferida. Leonardo foi também o primeiro a reconhecer que a idade de uma árvore pode ser determinada pelo número de anéis na seção transversal de seu tronco e que a largura dos anéis tem relação com a umidade ou secura dos anos correspondentes.

Nem todas as observações botânicas de Leonardo eram originais, mas ele sempre as articulava com muito maior brilho que seus contemporâneos. De fato, as seções botânicas do *Tratado de Pintura* são mesmo estudos autênticos de botânica teórica. Nas palavras de William Emboden:

> O texto se transformou (...) num verdadeiro tratado de pesquisa científica que não encontra paralelo em nenhum outro da época. Embora haja empréstimos de obras alheias e alguns erros de interpretação em várias passagens, o trabalho pode ser considerado um extraordinário documento por incluir a verificação experimental dos fenômenos.[48]

PADRÕES DE RAMIFICAÇÃO

Muitas das notas de Leonardo na Sexta Seção do *Tratado de Pintura* são instruções aos pintores sobre como representar plantas, árvores e paisagens sob as mais diversas condições atmosféricas. Um bom terço dessa seção, porém, trata de seus estudos morfológicos. Ele descreve e ilustra, em

especial, diversos padrões de filotaxia que são característicos de plantas e árvores.

Leonardo identificou corretamente os três tipos básicos de ramifi - cação: alternados (ramos que se desviam de um lado para o outro), opostos (ramos que crescem em direções opostas a partir do mesmo nó) e espiralados (ramos sucessivos que rodeiam o tronco em ângulos iguais). Num desenho do *Tratado* (Fig. 3-8), ele ilustrou esses três tipos com os padrões de ramificação de um ulmeiro (*olmo*), um sabugueiro (*sambuco*) e uma nogueira (*noce*), respectivamente.

Face ao duradouro fascínio de Leonardo pela espiral como um padrão arquetípico da vida,[49] não surpreende que ele atentasse sobretudo para os padrões de ramificação hoje conhecidos como "filotaxia espiralada". Identificou vários tipos diferentes desses arranjos de folhas no caule, notando que em cada caso um número exato de rotações em volta dele se completa após certo número de ramificações. Mostrou, por exemplo, que "a natureza dispôs as folhas dos últimos ramos de muitas plantas de tal maneira que a sexta folha está sempre acima da primeira e assim sucessivamente, caso não haja interferência.[50]

Estudando os padrões de ramificação, Leonardo observou também diferentes padrões de floração. "Algumas flores que crescem em galhos de arbustos se abrem primeiro nas pontas dos galhos", observou no *Tratado*, "enquanto outras se abrem primeiro na parte mais baixa do caule.[51] Embora direta e simples, essa observação define um princípio básico que ainda é usado na botânica moderna para estabelecer categorias taxonômicas.[52]

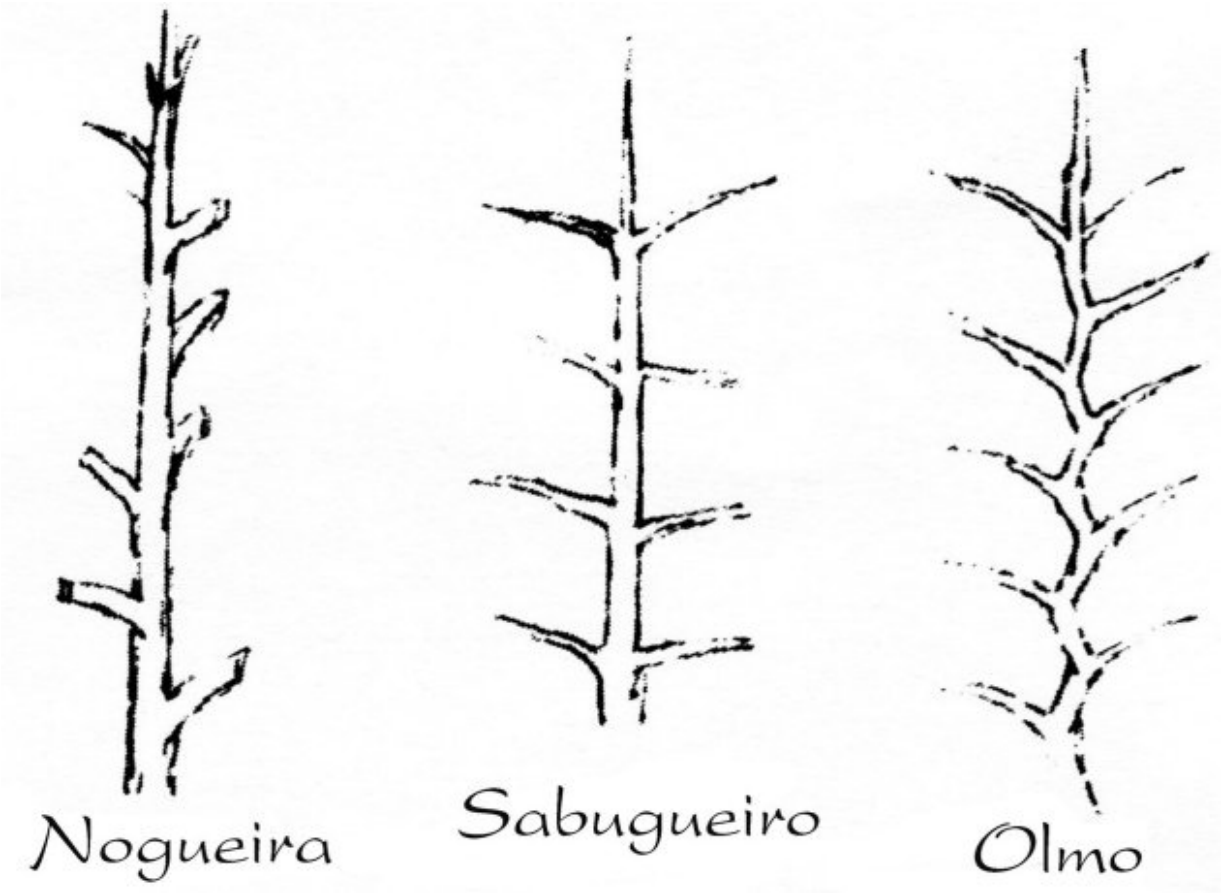


Figura 3-8: *Tipos básicos de ramificação ilustrados por um ulmeiro (direita), um sabugueiro (centro) e uma nogueira (esquerda), Trattato, cap. 890.*

Depois de identificar os tipos básicos de padrões de ramificação, Leonardo passou a estudar os processos que presidem a seu desenvolvimento. Para começar, notou acertadamente que ramos e frutos sempre saem dos botões laterais situados logo acima dos pontos de conexão das folhas. “Quando o broto e o fruto da primavera seguinte se projetam dos botões”, escreveu no Manuscrito G, “estes estão em cima e em estreito contato com a inserção das folhas”.[53] Mais adiante, no mesmo caderno de notas, acrescentou uma encantadora metáfora sobre a maneira com que a folha alimenta e protege o botão em sua axila (o ângulo formado pelo pedúnculo da folha e o caule principal):

> Todo broto e todo fruto se originam acima da inserção de sua folha, que faz as vezes de mãe dando-lhes água da chuva e umidade do orvalho caído à noite do céu; e, muitas vezes, protege-os do calor excessivo dos raios do sol.[54]

A mente curiosa de Leonardo não se contentava com a descrição da morfologia da ramificação em termos de axilas e botões laterais. Ele queria saber o que faz esses brotos crescer em determinados lugares, gerando determinadas sequências de ramificação. E respondeu à pergunta com uma hipótese notável. Sugeriu que os padrões de ramificação dependem do "humor" ou "seiva vital" que nutre os tecidos das plantas:

> Caso não haja mais galhos entre uma ramificação e outra, a árvore terá grossura uniforme, pois a soma da seiva que alimenta o início do galho continuará a alimentá-lo até ele produzir o galho seguinte. E essa alimentação, ou causa igual, gera igual efeito.[55]

Essa afirmativa, ligando a morfologia dos padrões de ramificação e a fisiologia do fluxo nutritivo, é com efeito das mais extraordinárias. "Não é pouca coisa", comenta o botânico Emboden, "afirmar que existe um 'humor' estabelecendo uma relação de causa e efeito na sequência da ramificação. O que hoje sabemos ser uma atividade hormonalmente condicionada relaciona-se à inativação de novos galhos numa área que (...) suporta um galho já existente de alto nível de atividade, e isso é aqui sugerido por Leonardo, embora de maneira indireta".[56] Com essa sugestão, Leonardo estava séculos à frente de seu tempo. "A distância entre os galhos (...) só foi explicada no século XX", escreve Emboden, "quando os centros de inativação gerados pela atividade hormonal se tornaram conhecidos dos botânicos".[57]

A intuição sagaz de Leonardo, de que há um vínculo causal entre o fluxo da seiva e os padrões de filotaxia, levou-o a outra observação altamente original sobre os sucessivos níveis de ramificação numa árvore. Em cada nível, assegurou ele, toda a área de seção transversal dos galhos permanece constante. No Manuscrito M, ilustrou claramente essa regra com dois esboços simples (Fig. 3-9) e elaborou-a de maneira sucinta numa passagem do Manuscrito I. “Todos os ramos das árvores”, anotou, “em cada etapa de seu desenvolvimento vertical, quando colocados juntos, são iguais à espessura do tronco”. E acrescentou: “Todas as ramifi - cações das águas, em qualquer etapa de sua extensão, sendo de igual movimento, são iguais também ao tamanho da corrente de onde saem suas ramificações.”[58]

O que torna a afirmativa de Leonardo tão notável não é bem sua plausibilidade intuitiva e sim o raciocínio no qual se baseia. Quando um galho cresce, sustenta Leonardo, sua espessura depende da quantidade de seiva que recebe da área abaixo do ponto de ramificação. Na árvore como um todo, há um fluxo constante de seiva, que sobe do tronco e depois se divide entre os galhos, transitando para cima e para fora em sucessivas ramificações. Como a quantidade total de seiva na árvore é constante, a quantidade levada a cada galho será proporcional à sua seção transversal e, portanto, essa seção igualará, em cada nível, a do tronco.

O argumento de Leonardo é típico da espécie de pensamento sistêmico que encontramos repetidas vezes em sua ciência. Tendo estabelecido o vínculo conceitual entre a morfologia das sucessivas ramificações e a fisiologia do

fluxo da seiva, ele compara em seguida esse fluxo de seiva ao fluxo de água pelos ramos tributários de um rio. Em seus meticulosos estudos da água corrente, Leonardo já descobrira e articulara com clareza o princípio de continuidade.[59] Portanto, era natural que o aplicasse ao fluxo da seiva na árvore e daí deduzisse regras de proporção correspondentes. Além disso, aplicou o mesmo raciocínio, em seus estudos anatômicos, ao fluxo de sangue pela rede de artérias e veias, bem como ao fluxo de ar pelas ramificações da traqueia, comparando ambos aos padrões de ramificação de rios e árvores.[60]

No que diz respeito às ramificações de árvores, a botânica moderna mostrou que a regra de Leonardo não é absolutamente correta porque o fluxo de açúcares e hormônios não representa o único fator determinante da espessura dos galhos.[61] Ainda assim, a compreensão intuitiva de Leonardo do vínculo causal entre filotaxia e fluxo de seiva, muito antes do desenvolvimento da bioquímica, é sem dúvida surpreendente.

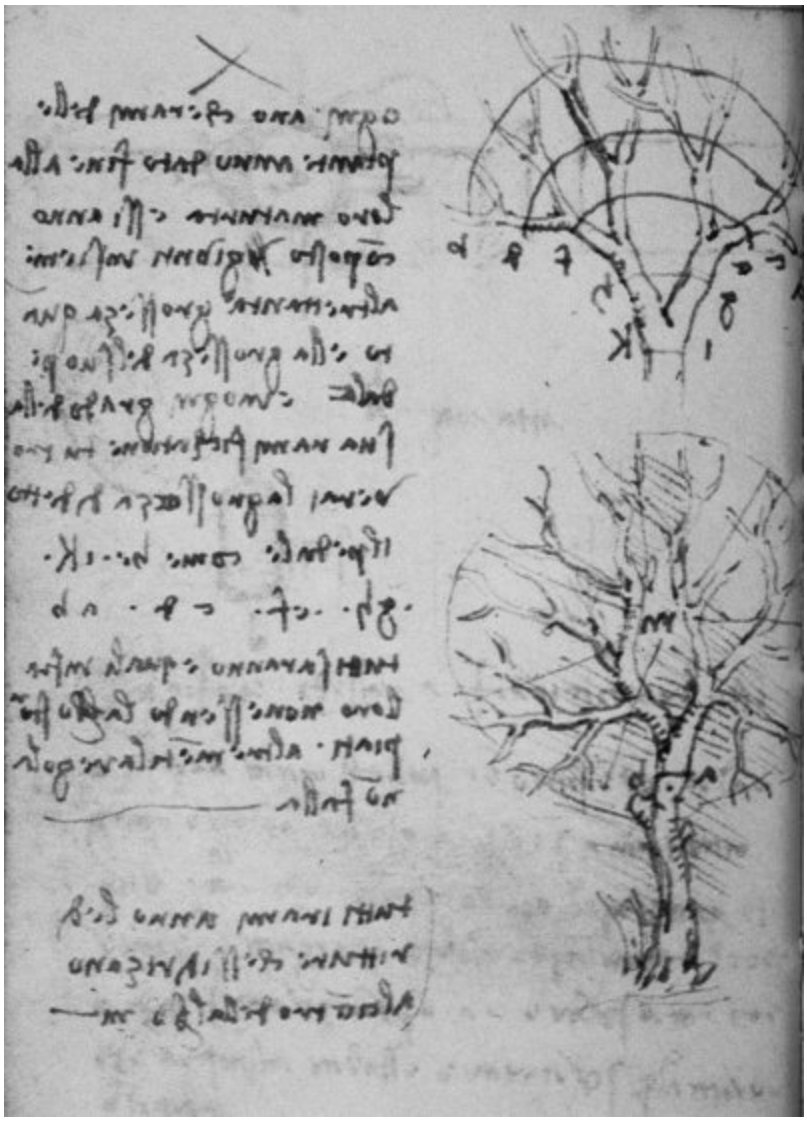


Figura 3-9: *Ramificações de uma árvore em que a área de seção transversal total dos galhos permanece constante em cada nível, Ms. M, fólio 78v.*

O CRESCIMENTO DAS PLANTAS

Para Leonardo, descrever “todas as formas da natureza” com a máxima exatidão, e registrá-las em magníficos desenhos e pinturas, não bastava. Ele tinha de ir mais fundo para entender a natureza e as raízes causais dos processos que moldam continuamente as formas vivas. De fato, a exploração das relações causais é uma das principais

características que distinguem a pesquisa de Leonardo das de outros estudiosos da Renascença e a fazem parecer tão moderna aos nossos olhos. Em botânica isso significa, como já dissemos, que ele interligava as disciplinas hoje conhecidas como morfologia e fisiologia vegetal.

Em seus estudos do crescimento das plantas, Leonardo explorou questões importantes a respeito de vários processos básicos hoje investigados pelos fisiologistas vegetais. Como as plantas adquirem a energia e os nutrientes necessários para seu crescimento? Como crescem em resposta ao estímulo ambiental? Quais são os caminhos do fluxo nutritivo pelos tecidos da planta? Como as plantas regulam seu crescimento? Quais são as etapas de germinação da semente à muda? Na botânica moderna, essas questões são respondidas na linguagem da bioquímica e da biologia celular e molecular, envolvendo conceitos como fotossíntese, tropismo, trajetos metabólicos e hormônios vegetais. Leonardo, é claro, não tinha acesso a esses níveis de explicação científica. Mas suas observações meticulosas e sua grande intuição da natureza das formas orgânicas levaram-no a várias conclusões notavelmente próximas do moderno conhecimento botânico.

Os antigos acreditavam que as plantas crescem porque, literalmente, ingerem terra a fim de se nutrir e aumentar sua massa. Leonardo examinou os ensinamentos tradicionais com espírito crítico e, para tanto, testou-os recorrendo a um experimento simples. Arrancou pelas raízes uma muda de aboboreira e a fez alcançar a maturidade suprindo-a unicamente de água. “No experimento (...) deixei apenas uma pequena raiz num dos

frutos”, registra ele no Manuscrito G, “que alimentei apenas com água. Esse fruto levou à perfeição todos os outros que pôde produzir, cerca de sessenta do tipo grande”.[62] Graças a esse experimento, Leonardo chegou à notável conclusão de que “o sol dá espírito e vida às plantas, enquanto a terra as alimenta com umidade”.[63]

Para avaliar a originalidade dessa conclusão e o modo como Leonardo chegou a ela, devemos nos lembrar de que os experimentos botânicos eram coisa desconhecida no início do século XVI. Conforme notou Emboden, somente em meados do século XVII foi realizado um experimento semelhante ao de Leonardo.[64] Nos anos 1640, o médico belga Jan Baptista van Helmont plantou um pequeno salgueiro num vaso de cerâmica onde só colocou água. Depois de cinco anos, segundo Helmont, o peso da árvore aumentara significativamente, embora a terra houvesse perdido apenas alguns gramas. Concluiu daí que o corpo adicional da planta fora produzido apenas pela água.

Hoje sabemos que a conclusão de Helmont estava errada, uma vez que a maior parte da massa adquirida durante o crescimento da planta vem do ar. A raiz absorve água e sais minerais da terra, e a seiva resultante sobe para as folhas, onde se combina com o dióxido de carbono (CO_2) do ar para produzir açúcares e outros compostos orgânicos. Nesse processo maravilhoso, conhecido como fotossíntese, a energia solar se converte em energia química e prende as substâncias orgânicas, enquanto o oxigênio é liberado no ar. A maior parte do corpo da planta – inclusive a celulose e outros componentes produzidos durante a fotossíntese – consiste de átomos pesados de carbono e oxigênio, que ela

retira diretamente do ar sob a forma de CO_2. Assim, embora ainda hoje muitas pessoas tendam a acreditar que as plantas crescem da terra, na verdade boa parte de sua massa provém do ar.

Tanto Leonardo quanto Helmont viveram muito antes do advento da química e, portanto, não poderiam identificar os processos complexos envolvidos na fotossíntese. No entanto, como assinala Emboden, Leonardo se aproximou muito de nossa moderna compreensão "ao sugerir que o sol, tanto quanto a umidade da terra, era o responsável pela massa do corpo da planta".[65] O papel decisivo da luz do sol na fotossíntese foi descoberto pelo fisiologista holandês Jan Ingenhouz no final do século XVIII, mas a plena compreensão de sua complexa bioquímica só se tornou possível no século XX.

O Manuscrito G contém outra notável passagem em que Leonardo parece intuir o papel da atmosfera no processo da fotossíntese. Algumas páginas após a descrição de seu experimento botânico, ele observa:

> Os ramos mais baixos, depois de formar o ângulo de sua separação do tronco de onde provieram, sempre pendem para baixo a fim de não sufocar os outros ramos que se projetam acima deles no mesmo tronco e a fim de melhor absorver o ar que os nutre.[66]

Essa passagem é digna de nota não apenas por causa da sugestão brilhante (e correta) de que as plantas recebem nutrição da atmosfera, mas também por revelar que Leonardo conhecia o tropismo, a tendência das plantas a orientar-se em resposta aos estímulos ambientais. Além de constatar a inclinação dos ramos em resposta à gravidade, conhecida pelos botânicos de hoje como geotropismo,

Leonardo observou o fenômeno do fototropismo, isto é, a orientação das plantas para a luz. “As extremidades dos ramos das plantas”, escreveu ele no *Tratado de Pintura*, “a menos que sejam puxadas pelo peso do fruto, voltam-se para o céu o máximo possível”.[67]

Tanto o fototropismo quanto o geotropismo foram redescobertos e estudados em detalhe por Charles Darwin no final do século XIX.

Para entender como as plantas se orientam e crescem de determinadas maneiras, Leonardo analisou o fluxo da seiva nos tecidos vegetais, como fizera a fim de explicar os padrões de ramificação. Aplicou o termo “seiva vital” (*umore*) ao fluido vital essencial das plantas e acreditava que ele não só nutria seus tecidos como regulava seu crescimento. Atualmente, sabemos que a seiva contém açúcares e hormônios, e que estes na verdade afetam vários aspectos do crescimento vegetal. Como assinala Emboden, os efeitos da atividade hormonal no crescimento das plantas só foram compreendidos no século XX.[68] É, pois, impressionante que Leonardo haja descrito vários deles qualitativamente ainda no começo do século XVI.

Em seus estudos de árvores, Leonardo distinguiu corretamente entre a camada externa morta da casca, também conhecida como cortiça, e a camada viva interna, que os botânicos chamam de floema e que ele defi - niu perfeitamente como “a camisa que jaz entre a casca e a madeira”.[69] Reconheceu que a função desse tecido vascular consiste no transporte de seiva e que, consequentemente, ele é de crucial importância para manter a planta viva. “Na casca e na camisa está a vida da planta”, anotou no

Tratado.[70] Contudo, Leonardo não chegou a reconhecer que o transporte de água e minerais ocorre no xilema (ou madeira), dentro do floema, embora identificasse a casca interna e a madeira (floema e xilema) como dois tecidos distintos. O sistema de transporte do xilema só se tornou conhecido no final do século XVII.[71]

Um excelente exemplo das observações precisas de Leonardo é o do chamado crescimento secundário (o aumento do diâmetro da ár - vore), no qual células novas são criadas no floema e algumas se diferenciam em cortiça; a cortiça se torna parte da casca, enquanto as camadas externas desta se racham para acomodar a expansão. A descrição que Leonardo fez desse processo altamente complexo é bastante exata:

> O crescimento em espessura das árvores é promovido pela seiva que, no mês de abril, se produz entre a casca interna e a madeira. Nessa época, a casca interna se converte em externa, que por sua vez adquire novas rachaduras dentro das já existentes.[72]

Em suas observações do crescimento secundário, Leonardo notou também que algumas das células recém-produzidas se diferenciam em madeira, primeiro se transformando em alburno e depois em cerne, que dá força ao tronco. Descobriu não apenas que esse processo gera os anéis anuais de crescimento nas seções transversais dos galhos e troncos, podendo, pois, a idade aproximada de uma árvore cortada ser presumida pela contagem dos anéis, mas também – e isso é ainda mais notável – que a largura de um anel é uma indicação do clima durante o ano que lhe corresponde. “Os anéis nos ramos cortados revelam o número de seus anos”, registrou Leonardo no *Tratado de*

Pintura, “e a maior ou menor espessura dos anéis mostra quais anos foram mais úmidos e mais secos”. E acrescenta, como que de passagem: “Embora isso não tenha importância na pintura, mesmo assim quero descrevê-lo a fim de omitir o mínimo possível daquilo que sei sobre as árvores.”[73]

Leonardo pressentia que o fluxo de seiva pela casca interna das árvores afeta seu crescimento de várias maneiras. Como bem ressaltou Emboden, esses estudos são fascinantes porque muitas das observações de Leonardo se referem implicitamente a atividades hormonais, séculos antes da descoberta dos hormônios.[74] A fim de observar o fluxo de seiva no floema, Leonardo prestou muita atenção aos ferimentos so fridos pelas árvores. Concluiu que, nesses casos, a seiva acorre em defesa da parte machucada, onde estimula um crescimento vigoroso. Os enxertos de galhos ofereciam-lhe amplas oportunidades de observar esse efeito. “Quando um ramo é cortado e, no local, se enxerta um de seus próprios brotos”, reparou ele, “com o tempo esse broto fica bem maior que o ramo que o nutre, pois a nutrição ou seiva vital acorre em defesa da parte machucada”.[75] Esse fenômeno, bastante conhecido dos botânicos, é hoje associado à atividade coletiva de vários tipos de hormônios.[76]

Numa passagem do Codex Atlanticus, Leonardo descreve o mesmo efeito no caso de uma árvore que perdeu parte da casca:

> Quando se arranca um pedaço da casca de uma árvore, a natureza (...) desvia para o local uma quantidade maior de umidade nutritiva do que para qualquer outra parte; assim (...) ali a casca fica bem mais grossa do que nos outros lugares. Essa umidade tem tamanho poder de movimento que,

> depois de alcançar o ponto onde sua ajuda é necessária, produz vários botões e brotos, mais ou menos como a água ao ferver.[77]

Como antes, a observação de Leonardo do rápido desvio da “umidade nutritiva” para a área afetada refere-se implicitamente à migração de açúcares e hormônios, que produzem mais tecido no local a regenerar do que no resto da casca. A velocidade do fluxo da seiva veda a área machucada antes que as bactérias e os fungos provoquem seu apodrecimento. Segundo Emboden, “esses ‘botões e brotos (...) como a água ao ferver’ foram confirmados por botânicos modernos e são vistos hoje como resultantes de elevadas pressões hidrostáticas nas células tipicamente alongadas do floema, conhecidas como células crivosas.[78]

Em vista dessa acurada localização do fluxo de seiva no floema, ou “casca interna”, não é de surpreender que Leonardo estivesse bem a par do efeito letal da “incisão anelar”: a árvore morre quando um anel inteiro de casca é removido. “Se tirarmos um anel de casca da árvore”, afirma ele no Manuscrito B, “ela morrerá do anel para cima, mas continuará viva do anel para baixo”.[79] Segundo Emboden, essa afirmação mostra que Leonardo sabia que a seiva é armazenada nas raízes e partes baixas da árvore, e que a incisão anelar, impedindo-a de fluir para cima através do floema, corta o suprimento vital da árvore.[80] Com efeito, o armazenamento da seiva nas raízes é mencionado explicitamente numa nota do Manuscrito G: “O tronco possui uma superfície protuberante provocada por suas raízes, que levam nutrição à árvore.”[81]

No entender de Emboden, a observação mais notável de Leonardo com referência aos efeitos do fluxo de seiva no

crescimento da planta está na seguinte nota do *Tratado de Pintura*:

> A seiva, quando não absorve o calor do sol, desce para a porção inferior do galho; e nutre mais as partes onde existe em maior abundância.[82]

Conforme explica Emboden, um botânico moderno interpretaria essa passagem como a descrição da migração de hormônios do crescimento, as auxinas, ao longo de um galho, em cuja parte mais baixa se acumulam por causa da gravidade.

Emboden esclarece que a afirmação de Leonardo na verdade inclui duas observações distintas, ambas "absolutamente extraordinárias por sua exatidão".[83] A primeira é que parte da seiva pode ser desativada pela luz do sol e isso de fato ocorre com as auxinas. A segunda é que a seiva, quando não tocada pelo sol, "desce para a porção inferior do galho". A migração de auxinas do lado claro para o lado escuro do tronco foi reconhecida pela botânica moderna como um dos motivos fundamentais que induzem as plantas a se voltar para o sol.

É verdadeiramente de admirar que, muito antes da descoberta dos hormônios e do advento da bioquímica, Leonardo tenha conseguido, só com seus tremendos poderes de observação e sua profunda intuição, chegar a um correto entendimento qualitativo dos padrões de ramificação, crescimento secundário, anéis anuais de crescimento, fototropismo e reação das árvores às incisões. Como os modernos fisiologistas vegetais, ele explicou esses fenômenos em termos de peculiaridades do fluxo de fluido vital das plantas por seus tecidos vasculares.

Nos anos de 1508-1512, enquanto se dedicava de corpo e alma a estudos de botânica teórica, Leonardo começou também a organizar seus cadernos de notas, elaborou diversos tratados abrangentes e empreendeu pesquisas anatômicas avançadas.[84] Não é de espantar, pois, que ele muitas vezes tenha estabelecido vínculos conceituais entre suas observações botânicas e suas pesquisas das "qualidades de formas" em outras áreas. Comparou, por exemplo, os padrões de ramificação das árvores com os dos rios e vasos sanguíneos. Desenhou folhagens espiraladas que lembram os vórtices helicoidais de água. Associou o fluxo da seiva pelos tecidos vasculares das plantas ao fluxo do sangue pelas artérias e veias do corpo humano.

Uma das comparações mais sofisticadas que Leonardo estabeleceu de formas orgânicas em diferentes sistemas vivos está em seus estudos de sementes de plantas. Uma folha da Coleção Windsor contém a seguinte nota:

> Toda semente tem um cordão umbilical, rompido quando ela amadurece. Do mesmo modo, tem uma matriz e uma secundina, como as ervas e as sementes de bainha. Entretanto, as sementes de casca como a avelã, o pistache etc., possuem um comprido cordão umbilical que aparece em sua infância.[85]

Como explica Emboden, Leonardo percebeu corretamente que, nas plantas que dão flores, a semente se desenvolve a partir de uma estrutura situada dentro do ovário da flor, hoje chamada de óvulo, que permanece presa à parede ovariana por um pedúnculo conhecido pelos botânicos como funículo, até se transformar em semente após a fertilização.[86] A "matriz" e a "secundina", na nota de

Leonardo, referem-se às camadas externas do óvulo, que hoje chamamos de tegumentos.

O mais notável na observação de Leonardo é sua identificação do funículo (o pedúnculo que liga a semente à parede do ovário) com o cordão umbilical, que prende o embrião dos mamíferos à placenta. Depois de estudar nos mínimos detalhes o desenvolvimento do feto humano, representando-o em maravilhosos desenhos,[87] ele só podia ficar impressionado com a delicada similaridade estrutural entre a evolução das sementes vegetais e a dos embriões dos mamíferos. Isso constituiu, a seu ver, uma prova incontestável da unidade da vida em todas as escalas da natureza, tese com a qual os botânicos modernos concordam plenamente. Chamam o tecido interno do ovário, ao qual o óvulo se prende, de placenta; e, como Leonardo, consideram o funículo o equivalente do cordão umbilical.

As observações altamente sutis de Leonardo das intricadas formas botânicas, tanto quanto sua capacidade de entendê-las sob a ótica de processos subjacentes de metabolismo e desenvolvimento, colocam-no bem acima dos filósofos naturais da época. Reconhecendo esse fato, Filippo Bottazzi, fisiologista e especialista em Leonardo, concluiu seu ensaio clássico, “Leonardo como Fisiologista”, prestando-lhe a seguinte homenagem:

Na arte, esse homem foi grande entre os grandes; na recuperação das ciências mecânicas, foi o primeiro e o mais destacado representante. Mas a história da biologia moderna começa com ele.[88]

PARTE II

FORMA E TRANSFORMAÇÃO NO CORPO HUMANO

CAPÍTULO 4

A figura humana

Nos três capítulos precedentes, analisei a ciência da vida de Leonardo no macrocosmo – seus estudos do fluxo de água, fluido vital e veículo da vida; suas pesquisas sobre o corpo vivo e as mudanças da Terra em longos períodos de tempo, durante os quais as rochas se desgastam aos poucos, transformam-se em cascalho e por fim no solo fértil que provê sustento à vida; e, para concluir, suas observações sobre os padrões de crescimento e as interações das plantas com o ar, a água e o solo da Terra viva.

Para Leonardo, essas manifestações de vida, hoje objeto de ciências separadas como a dinâmica dos fluidos, a geologia, a botânica e a ecologia, eram todas fios de um mesmo tecido inconsútil.

E sempre que explorava as formas da natureza no macrocosmo da Terra viva, Leonardo procurava qualidades e padrões similares no microcosmo do corpo humano.[1] Com efeito, desde os primeiros estudos anatômicos aprofundados em Milão, quando estava por volta dos 30 anos, até as pesquisas mais sofisticadas em cardiologia e embriologia, já na velhice, o trabalho de Leonardo em

anatomia sempre caminhou *pari passu* com investigações de fenômenos relacionados, atualmente estudados em física, geologia e botânica.[2]

CRONOLOGIA DA PESQUISA ANATÔMICA

Desde os tempos de seu aprendizado em Florença, Leonardo conhecia bem a técnica da dissecção de músculos, praticada por muitos pintores renascentistas. No entanto, seus primeiros estudos anatômicos mais ou menos consistentes e suas dissecções sistemáticas não se ocupavam dos músculos e sim dos trajetos dos nervos sensoriais, sobretudo o nervo óptico, no crânio humano. No final da década de 1480, ele registrou suas descobertas em diversas pinturas realmente impressionantes do crânio (por exemplo, Fig. 4-1), famosas pelo delicado tratamento da luz e da sombra e a magistral aplicação da perspectiva visual.[3] O olho treinado do médico vê, nessas obras extremamente precisas, representações exatas das cavidades do cérebro e dos terminais nervosos – órbitas oculares, seios perinasais, canais lacrimais e forames (aberturas) para os nervos ópticos e auditivos. [4]

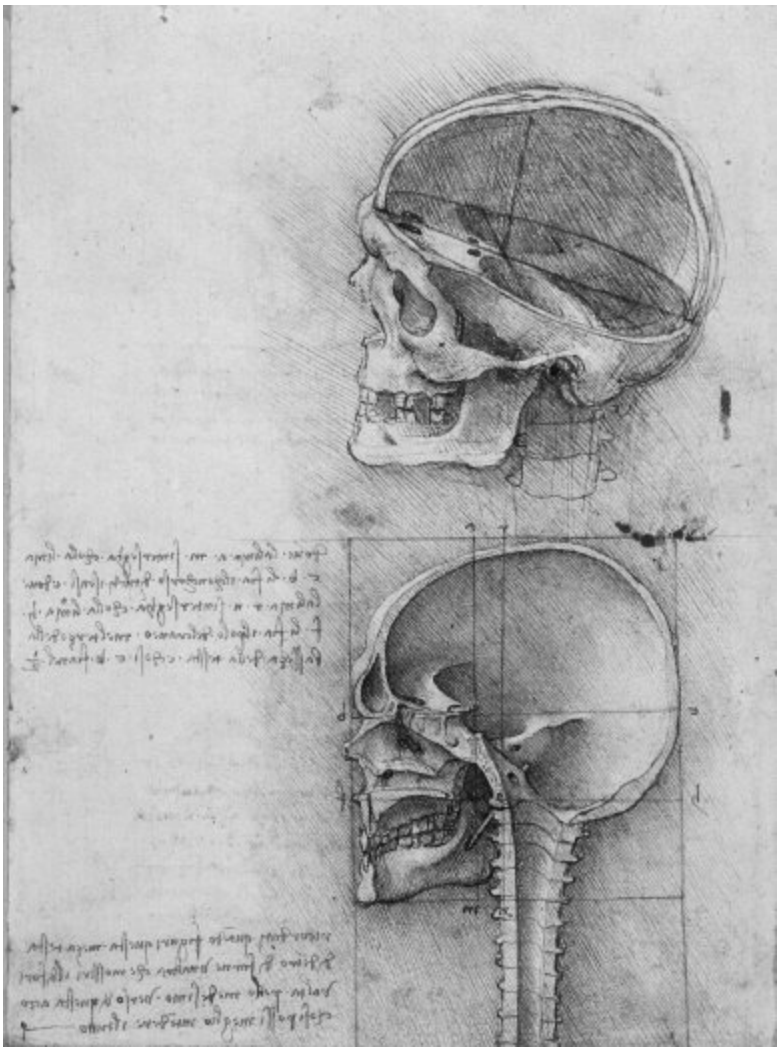


Figura 4-1: *Seção do crânio humano, c. 1489, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 43r.*

Essa fase do trabalho anatômico de Leonardo era parte de um ambicioso programa de pesquisa dedicado ao processo inteiro de percepção e aquisição de conhecimento. Começou com o estudo da perspectiva, da geometria dos raios luminosos (hoje conhecido como óptica geométrica) e do jogo de luz e sombra. Em seguida, Leonardo passou a explorar a própria natureza da luz, a anatomia do olho e a fisiologia da visão, e os trajetos das impressões ópticas ao longo dos nervos cranianos até o centro do cérebro, onde

ele localizava a “sede da alma”. Discuti minuciosamente, em *A Ciência de Leonardo da Vinci*, o amplo estudo que Leonardo empreendeu do processo de percepção.[5] Esse estudo resultou não apenas em notáveis descobertas anatômicas como lhe permitiu formular conceitos altamente originais sobre a relação entre realidade física e processos cognitivos, que só reapareceram há pouco tempo no novo campo interdisciplinar da ciência cognitiva.

A próxima fase da pesquisa anatômica de Leonardo ocupou-se do corpo humano em movimento. Todavia, investigações mais detalhadas de um tema complexo tiveram de aguardar ainda uns quinze anos. E o principal motivo desse longo intervalo foi que, no início da década de 1490, Leonardo se entusiasmou pela matemática, principalmente a geometria, ao perceber que uma análise aprofundada de como os nervos, os músculos, os tendões e os ossos funcionam em conjunto a fim de mover o corpo exigia uma compreensão básica dos princípios da me cânica. “A natureza não pode dar movimento aos animais sem instrumentos mecânicos”, observou ele,[6] e mergulhou em prolongados estudos sobre como aplicar a geometria a problemas elementares de pesos, força e movimento – os ramos da mecânica hoje conhecidos como estática, dinâmica e cinemática. Desde o início, essa pesquisa se voltou tanto para os trabalhos das máquinas quanto para a compreensão do corpo humano e seus movimentos. Com efeito, Leonardo começou com uma série de experimentos para determinar quanta força as diversas partes do corpo poderiam gerar em diferentes posições e anotou meticulosamente os resultados.[7]

Por volta de 1506, no início de seu segundo período em Milão, Leonardo deve ter presumido que adquirira conhecimento e habilidades suficientes em mecânica para retomar seus estudos anatômicos. Três anos depois, esboçou planos para um vasto tratado de anatomia intitulado *De Figura Umana* (“Sobre a Figura Humana”). A obra conteria 120 “livros” (capítulos) com demonstrações de cada aspecto concebível das ações combinadas dos nervos, músculos, tendões e ossos.

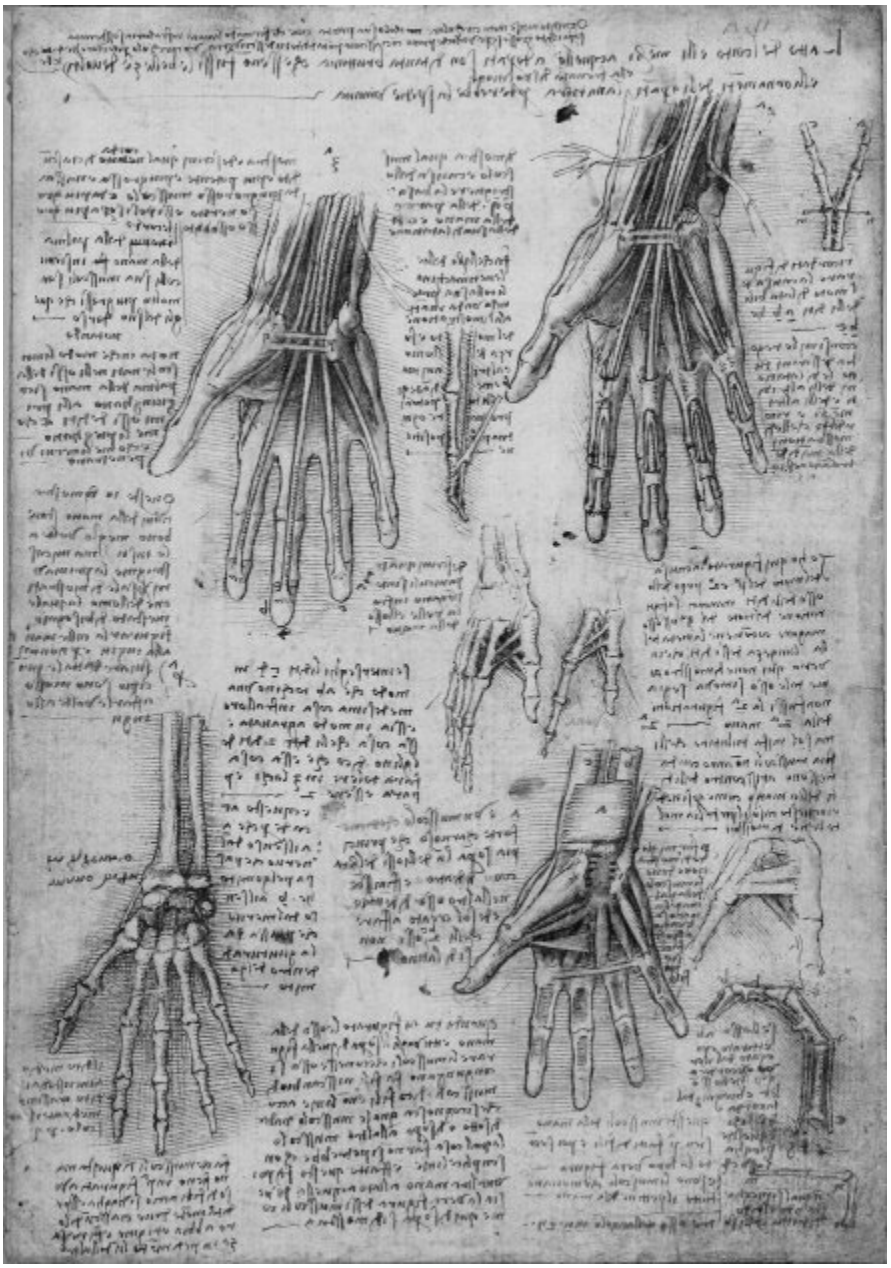


Figura 4-2: *Os mecanismos da mão, c. 1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 143r.*

"Minha configuração do corpo humano será demonstrada ao leitor como se ele tivesse o homem natural diante de si",[8] anunciou Leonardo no início de seu minucioso esboço e explicou em seguida por que isso exigiria numerosas dissecções.[9] Ignoramos quantos capítulos desse ambicioso tratado da figura humana Leonardo compôs; mas

o grande número de maravilhosos desenhos de nervos, vasos sanguíneos, músculos e ossos que ele produziu durante os anos 1506-1510, hoje na Coleção Windsor, revela que suas promessas não eram exageradas.

Num desses fólios, mostrando a anatomia e as ações dos músculos e tendões da mão (Fig. 4-2), Leonardo escreveu o seguinte lembrete para si mesmo, colocado com destaque no centro da página:

> Dispor o assunto de tal modo que o livro sobre os elementos de mecânica, com sua prática, preceda a demonstração do movimento e da força tanto no homem quanto nos outros animais, de sorte que, por esse meio, possam ser provadas todas as nossas teses.[10]

A primeira década do século XVI foi o período em que Leonardo empreendeu suas pesquisas anatômicas mais intensivas. Elas resultaram numa riquíssima produção de desenhos, que cobrem todos os aspectos da anatomia humana. A habilidade de Leonardo na dissecção anatômica superou em muito a do primeiro período e suas observações se tornaram impressionantemente acuradas. Ao mesmo tempo, esse período foi o de sua mais sofisticada pesquisa em geologia, registrada no Codex Leicester e no Manuscrito F.[11] Parece que investigar, por um lado, os ossos, tecidos e sangue do corpo humano, e, por outro, as rochas, o solo e a água da Terra viva eram para Leonardo atividades científicas que se reforçavam mutuamente e confirmavam sua crença na unidade fundamental da vida em todas as escalas da natureza.

Leonardo sempre considerou o corpo humano um corpo animal, como fazemos na biologia de hoje, e frequentemente comparava diversas partes da anatomia

dos homens com a anatomia dos animais. Nada mais natural, já que seu acesso a cadáveres humanos era limitado e muitas vezes ele tinha de recorrer a dissecções de animais.[12] Um dos principais temas da anatomia comparada de Leonardo foi a justaposição dos mecanismos do movimento em homens e animais, sobretudo o voo dos pássaros, que o fascinou a vida inteira.[13]

A terceira fase da pesquisa anatômica de Leonardo se iniciou depois de seu encontro com o jovem anatomista Marcantonio della Torre em 1510.[14] As discussões com esse brilhante estudioso médico inspiraram Leonardo a levar seu trabalho anatômico muito além das áreas ligadas ao movimento físico. Nos anos seguintes, ele mergulhou fundo no corpo para estudar as funções dos órgãos internos, a respiração e o fluxo sanguíneo.

O que caracterizou essa terceira e última fase foi o esforço persistente para entender a natureza da vida, conforme se pode ver por suas anatomias dos órgãos internos e, sobretudo, por seus estudos do coração – o órgão que sempre simbolizou a existência humana e a vida emocional ao longo das idades.

O trabalho cuidadoso e paciente de Leonardo com os movimentos do coração e o fluxo do sangue, empreendido em Milão e Roma quando ele já passava dos 60 anos, são o ponto alto de sua atividade anatômica. Ele não apenas compreendeu e pintou o coração de um modo que ninguém antes fora capaz de fazer como observou sutilezas em seu funcionamento e no fluxo sanguíneo que escaparam aos pesquisadores médicos por séculos.

Durante a última década de sua vida, quando se ocupava de estudos avançados do coração humano, Leonardo começou a se interessar profundamente por outro aspecto do mistério da vida: sua origem nos processos de reprodução e desenvolvimento embrionário. Que tenha sempre considerado a embriologia parte integrante de seus estudos do corpo humano, é evidente a partir de um resumo antigo do tratado que planejou sobre a figura humana, escrito em 1489 durante a primeira fase de seus estudos anatômicos. Esse resumo começa com a seguinte declaração ambiciosa:

> O trabalho deve principiar pela concepção do homem, descrever a natureza do útero, como e por quanto tempo a criança vive ali dentro, e de que maneira absorve vida e nutrição; seu desenvolvimento, que intervalo existe entre um grau de crescimento e outro, e o que o empurra para fora do corpo da mãe.[15]

Os estudos embriológicos de Leonardo, baseados largamente em dissecções de vacas e ovelhas, incluíam muitos dos tópicos que catalogou e que lhe permitiram chegar a observações e conclusões notáveis. Ele descreveu os processos vitais do feto no ventre materno, inclusive sua nutrição por meio do cordão umbilical, com uma espantosa riqueza de detalhes; e realizou também uma série de mensurações dos fetos animais a fim de determinar suas taxas de crescimento. Os desenhos embriológicos de Leonardo são delicadas revelações dos mistérios que cercam as primeiras etapas da vida humana.

BELEZA E PROPORÇÃO

Durante a primeira fase de sua pesquisa anatômica, em que investigou os trajetos dos nervos cranianos, Leonardo desenvolveu também um acentuado interesse pelas proporções do corpo humano e tentou associar formas anatômicas idealizadas com a perfeição matemática das figuras geométricas. Isso pode ser visto claramente em seus desenhos do crânio humano. Nos dois que mostramos na Figura 4-1, o crânio está inscrito num círculo cruzado por linhas a sugerir um sistema coordenado (em cima) e num retângulo no qual várias marcas indicam as proporções da caixa craniana (embaixo). Os estudos de Leonardo das proporções ideais do crânio humano, nesse período, refletem-se nas proporções regulares das cabeças de vários retratos seus, ao passo que os desvios dessas proporções ideais aparecem claramente nos famosos desenhos "grotescos".[16]

A associação que Leonardo fez de anatomia humana com perfeição de proporções matemáticas e formas geométricas brotou de seu intenso fascínio pela matemática durante esse período. O círculo e o quadrado, em particular, eram formas de simetria perfeita segundo a tradição platônica, além dos cinco sólidos platônicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro), que Leonardo explorou numa série de desenhos enquanto estudava geometria e proporção com o matemático Luca Pacioli.[17]

Com seu interesse pelas proporções, Leonardo seguia uma longa tradição nascida na Antiguidade clássica. Artistas como o escultor grego Policleto e o arquiteto romano Vitrúvio fizeram estudos detalhados das proporções humanas ideais; e ao longo da Idade Média e do

Renascimento, houve inúmeras tentativas de estabelecer um cânone de proporções para a figura humana. O mais sofisticado desses cânones foi o proposto, pouco antes do nascimento de Leonardo, pelo grande arquiteto e humanista Leon Battista Alberti em seu tratado *De Statua* (“Sobre a Escultura”).[18]

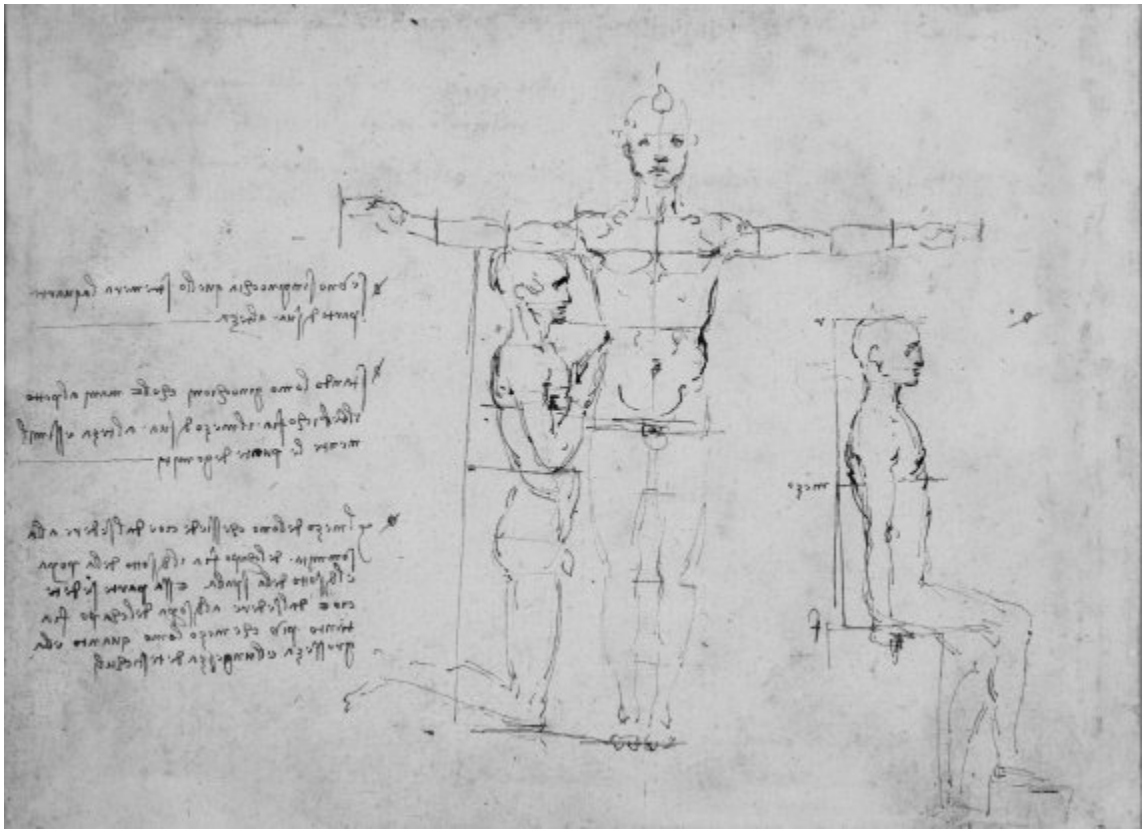


Figura 4-3: *Estudos das proporções do corpo humano de pé, ajoelhado e sentado, c. 1490, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 27r.*

No Renascimento, tanto artistas quanto filósofos eram apaixonados pelo estudo das proporções. Ela não apenas os ajudava a representar corretamente a figura humana em pinturas e esculturas como constituía a própria base da estética renascentista. A proporção na pintura, escultura e arquitetura era considerada a essência da harmonia e da

beleza, no microcosmo do corpo humano e no macrocosmo em geral. Assim, os arquitetos procuravam desenhar as dimensões de seus edifícios de modo que refletissem as proporções do corpo humano ideal, exprimindo-as, quando possível, em termos dos símbolos clássicos da perfeição: o quadrado, o círculo e a seção áurea.[19]

Nos anos 1489-1490, Leonardo mergulhou no estudo sistemático das proporções humanas com o vigor e a atenção aos detalhes de sempre. Tomou várias medidas a fim de estabelecer um sistema abrangente de correspondências entre todas as partes do corpo e registrou-as numa série de desenhos minuciosos (ver, por exemplo, a Fig. 4-3).[20] Esses estudos detalhados das relações corretas entre as diferentes partes do corpo, bem como entre as partes e o corpo como um todo, explicam a impressionante exatidão de seus desenhos anatômicos. “Aplicando a ciência da proporção à pesquisa anatômica”, escreve James Ackerman, historiador da arquitetura e especialista em Leonardo, “ele conseguiu produzir imagens vívidas do corpo nas quais cada parte poderia ser representada em seu devido lugar e em seu devido tamanho com relação às outras partes. Leonardo e seus contemporâneos elaboraram esquemas de ilustração anatômica que, ao longo dos séculos, só exigiram alterações menores”.[21]

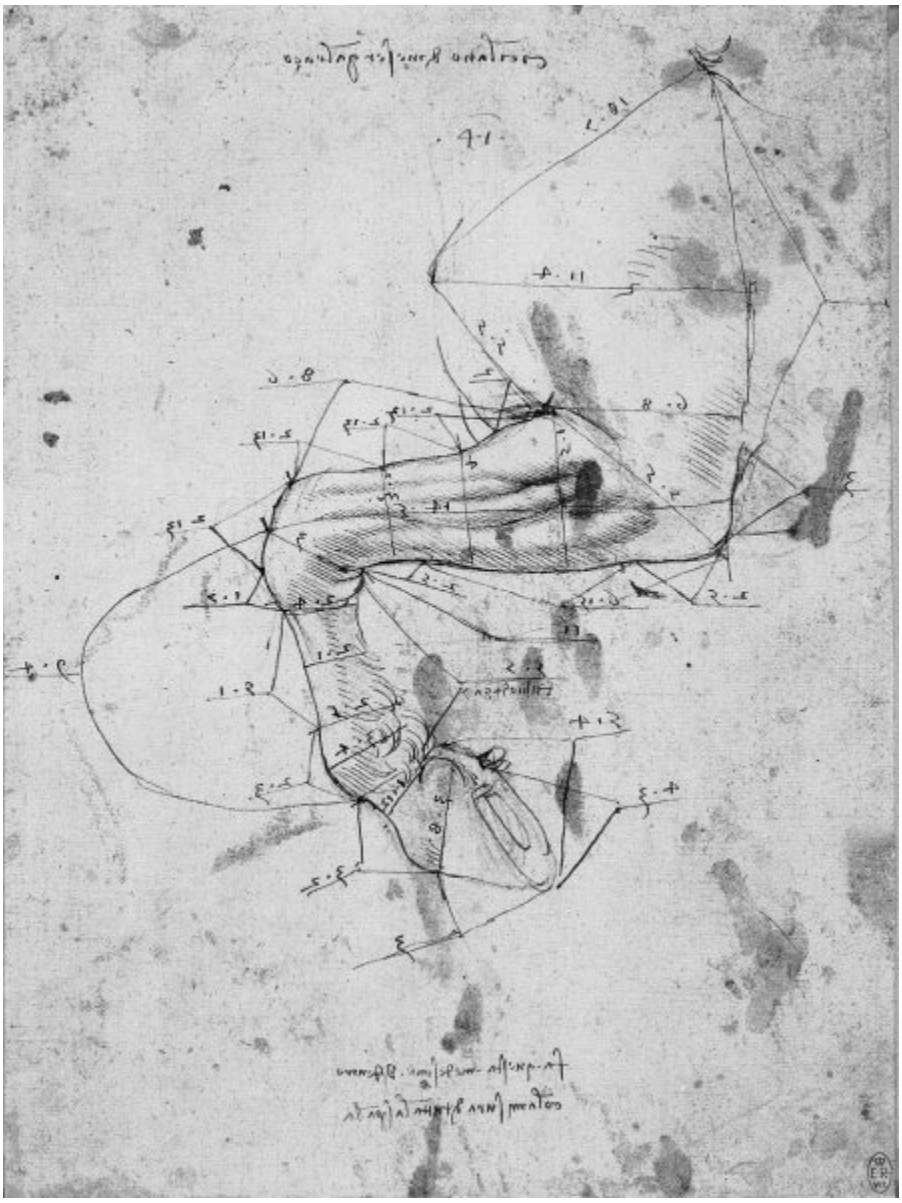


Figura 4-4: *Estudos das proporções de uma perna de cavalo, c.1485-1490, Coleção Windsor, Cavalos e Outros Animais, fólio 94.*

Além das proporções humanas, Leonardo empreendeu estudos pormenorizados das proporções ideais do cavalo (ver Fig. 4-4). Ele sempre teve uma queda especial por cavalos e, como muitos artistas da Renascença, via suas proporções e movimentos como coisas “nobres”, inferiores apenas às dos humanos.[22]

Porém, ao contrário dos artistas de sua época, a abordagem de Leonardo ao estudo da proporção era orgânica e física.[23] Diferentemente de Albrecht Dürer alguns anos depois, ele nunca adotou uma grade regular na qual o corpo e suas partes fossem inscritas: preferia desenhar primeiro o corpo humano tal qual o tinha diante dos olhos. Depois, tomava suas medidas e aplicava-as ao esboço que elaborara diretamente a partir da natureza. No dizer dos historiadores da arte Frank Zöllner e Johannes Nathan, mesmo num estudo primoroso como o da perna de um cavalo mostrado na Figura 4-4, as proporções do desenho nem sempre concordam com as medidas que ele registrou para o animal.[24] Parece que, para Leonardo, esses esboços e os números neles registrados eram sempre uma obra em andamento, meras aproximações de um cânone ideal de beleza e proporção.

Outro motivo pelo qual Leonardo nunca podia confinar o corpo a uma grade geométrica rígida era sua visão extremamente dinâmica da figura humana. A representação da forma humana em termos de movimentos e desenvolvimento – o segundo grande tema de sua pesquisa anatômica – já se entremostra nos estudos que ele fez da proporção. Para Leonardo, as proporções humanas jamais são estáticas; mudam quando o corpo se move e ajusta sua posição (conforme se vê na Fig. 4-3), mas se alteram também conforme a idade da personagem.

Segundo o historiador da ciência Domenico Laurenza, essa tentativa de combinar a procura da perfeição matemática com uma cuidadosa atenção à mudança e à transformação é um aspecto altamente original dos estudos

que Leonardo empreendeu das proporções e, de fato, caracteriza sua ciência como um todo:

> Variabilidade e constância de forma, mundo físico e perfeição geométrica, dimensão qualitativa e dimensão quantitativa: as ideias de Leonardo se situam entre esses polos opostos e tentam realizar uma síntese (...). Em sua investigação das formas, tanto naturais quanto geométricas, Leonardo procura sintetizar estes dois aspectos: a existência de leis de ordem e constância geométrica em plena variabilidade e transformação contínuas das formas físicas.[25]

Na tradição clássica, as ideias conflitantes de formas qualitativas sempre mutáveis e de perfeição matemática eterna foram expostas nas filosofias de Aristóteles e Platão, respectivamente. Os humanistas italianos estudaram ambas as escolas com afinco. Florença, no tempo dos Médici, era o centro do platonismo, enquanto Milão, sob a influência das universidades de Pádua e Bolonha, cultivava predominantemente o aristotelismo. Leonardo, que passou muitos anos em Florença e Milão, conhecia bem esses debates filosóficos. Sua ciência, enfatizando ao mesmo tempo as qualidades e a transformação, pode ser considerada bem mais aristotélica que platônica, mas ele era fascinado também pela precisão matemática, de sorte que a tensão entre as duas escolas é não raro evidente em seus escritos.

O HOMEM VITRUVIANO

O desenho mais famoso e mais completo que Leonardo fez das proporções humanas é a imagem icônica de um corpo humano em duas posições diferentes e superpostas: primeiro de pé, inscrito num quadrado, e depois, com

pernas e braços estendidos, inscrito num círculo (Gravura 4). O desenho, numa única folha hoje conservada nas Gallerie della Accademia, em Veneza, é conhecido como o "homem vitruviano" por ser uma ilustração fiel do cânone clássico das proporções humanas perfeitas estabelecido pelo arquiteto romano Vitrúvio. Na legenda, Leonardo resume as passagens relevantes do terceiro volume do tratado de Vitrúvio, *De Architectura* ("Sobre a Arquitetura"), em que são definidas as relações proporcionais exatas entre as várias partes do corpo humano ideal.

Leonardo começa assim o resumo: "Vitrúvio, o arquiteto, diz em sua obra sobre arquitetura que as medidas do corpo humano são distribuídas pela natureza da seguinte maneira: 4 dedos formam 1 palmo, 4 palmos formam 1 pé, 6 palmos formam um côvado, 4 côvados formam a altura do homem". Isso estabelece um sistema de unidades de comprimento expressas como frações da estatura humana: 1 côvado = $^1/_4$, 1 pé = $^1/_6$, 1 palmo = $^1/_{24}$ e 1 dedo = $^1/_{96}$ da altura. Essas unidades aparecem numa escala graduada embaixo do desenho de Leonardo.[26] A seguir, o artista menciona a prescrição de Vitrúvio sobre como inscrever o corpo humano ideal num círculo:

> Se a pessoa abrir as pernas a ponto de diminuir sua estatura em $^1/_{14}$, e estender e levantar os braços de modo que os dedos médios toquem a linha do alto da cabeça, verá que seu umbigo será o centro das extremidades dos membros estendidos; e que o espaço entre as pernas formará um triângulo equilátero.

A inscrição da figura num quadrado decorre da regra segundo a qual "a abertura dos braços estendidos de um homem é igual à sua altura". Finalmente, Leonardo cataloga

uma série de novas proporções que Vitrúvio, entre outros, estabeleceu:

> A distância entre as raízes dos cabelos e a parte inferior do queixo equivale à décima parte da estatura de um homem; entre a parte inferior do queixo e o alto da cabeça, à oitava parte da estatura de um homem; entre a parte superior do peito e o alto da cabeça, à sexta parte da estatura de um homem (...). A largura máxima dos ombros equivale à quarta parte da altura (...) e a mão inteira é a décima parte do homem.[27]

O célebre fólio veneziano é único entre os estudos que Leonardo realizou das proporções. Ao contrário de outros desenhos, não é um registro prático de suas próprias observações e medidas, mas uma representação visual definitiva de um cânone clássico para a figura humana perfeita. A disposição cuidadosa dos elementos do desenho e sua execução precisa sugerem que o fólio talvez haja sido destinado à reprodução em gravura; e também se aventou que Leonardo pode ter planejado usar o desenho como ponto de partida para um manual sobre as proporções humanas. Se assim foi, ele seguiu uma prática adotada em muitas outras áreas de seus estudos científicos. Em geral, começava por explicações ou conceitos comumente aceitos e resumia o que colhera dos textos clássicos antes de pô-lo à prova com suas próprias observações.[28] Na verdade, não hesitou em corrigir o cânone vitruviano. No fólio de Veneza, chama o pé de “a sétima parte do homem”, em lugar da sexta de Vitrúvio, e em desenhos anatômicos posteriores considera o rosto a nona parte da altura da figura e não a décima, como queria Vitrúvio.

Embora o famoso desenho de Leonardo seja uma ilustração exata das regras de proporção estabelecidas por Vitrúvio, ainda assim se pode considerá-lo uma contribuição

altamente original. Se Vitrúvio descreveu primeiro a configuração do corpo num círculo e depois num quadrado, Leonardo unificou visualmente as duas descrições. Como explica Domenico Laurenza, “Só uma imagem poderia demonstrar as duas possibilidades de maneira simultânea e, portanto, harmoniosa. Leonardo, assim fazendo, apresenta uma leitura fidedigna de Vitrúvio, mas parece entender esse conceito mais profundamente que o próprio Vitrúvio.”[29]

Vale notar que, antes de Leonardo, outros artistas da Renascença tentaram sobrepor as duas posições vitruvianas, sem consegui-lo. A maioria deles acabou por representar as duas posições em desenhos separados. Outros procuraram combinar ambas as imagens, mas não lograram obter a harmonia aparentemente natural do fólio veneziano. Em seus desenhos, nem todas as partes do corpo tocavam o círculo e o quadrado, conforme prescrito por Vitrúvio, ou então a figura humana se alongava de maneira artificial a fim de chegar ao resultado correto.[30]

Leonardo compreendeu que não poderia representar as prescrições vitruvianas corretamente sem distorcer de forma antinatural o corpo, no caso de o círculo e o quadrado serem concêntricos. Por isso, escolheu dois centros diferentes para as duas figuras. O umbigo é o centro da figura no círculo, conforme preceituara Vitrúvio, enquanto o osso pubiano é o centro da figura no quadrado. Esse ajustamento é a principal inovação de Leonardo e distingue claramente seu desenho das ilustrações mais antigas.[31]

Com essa escolha, Leonardo promoveu uma perfeita interdependência entre as duas figuras. Somente a cabeça é relacionada exclusivamente com o quadrado, conforme

especificara Vitrúvio. As pontas dos dedos dos braços estendidos tocam tanto o círculo quanto o quadrado, ao passo que os pés o fazem quando as pernas estão fechadas. A imagem toda é a de um único corpo em duas posições que coexistem harmoniosamente. Trata-se da síntese exclusiva que Leonardo conseguiu do cânone vitruviano das proporções, inigualada por qualquer artista antes ou depois dele.

O homem vitruviano de Leonardo pode ser visto também como uma integração única da ênfase aristotélica na mudança e na transformação com o ideal platônico de perfeição geométrica eterna. As duas posições da figura humana coexistem e interagem harmoniosamente – e o mesmo acontece às duas figuras geométricas. Quando a posição do corpo muda, o círculo e o quadrado se "transformam" um no outro.[32] O homem vitruviano é um exemplo precoce do duradouro fascínio de Leonardo pela transformação das figuras geométricas. Quinze anos depois que ele pintou o fólio veneziano, esse fascínio o levaria a desenvolver sua "geometria feita com movimento", em que hoje vemos uma precursora distante do ramo da matemática moderna conhecido como topologia.[33]

PROPORÇÃO E HARMONIA

O principal objetivo dos abrangentes estudos das proporções humanas empreendidos por Leonardo não era estabelecer um esquema geométrico definitivo e sim permitir-lhe representar uma figura humana individual de maneira que cada parte se integrasse num todo

harmonioso. “As belas proporções de uma face angélica na pintura”, escreveu no *Tratado*, “produzem uma concórdia harmoniosa que atinge o olho simultaneamente, assim como [um acorde na] música afeta o ouvido”.[34] A busca de harmonia ou beleza é notória não só em seus quadros, mas também em seus desenhos anatômicos. Como explica Laurenza:

> A anatomia de Leonardo está também sujeita à busca de configurações harmoniosas (...). Ele tenta sistematicamente produzir representações que reconstituam a extrema variedade e variabilidade das partes anatômicas individuais (reveladas pelas dissecções) numa composição coerente (...). Por volta de 1506-1508, Leonardo cria representações anatômicas que não apenas mostram os órgãos como um conjunto, em suas relações recíprocas, mas também enfatizam a simetria de alguns deles e a centralidade topológica de outros.[35]

O ponto alto dessas representações anatômicas integradas de Leonardo é o famoso desenho da anatomia do corpo feminino numa folha dupla da Coleção Windsor (Fig. 4-5). Trata-se de uma soberba imagem de vários sistemas anatômicos integrados – coração e vasos sanguíneos, traqueia e brônquios; fígado, baço e rins; trato urinário e sistema reprodutor –, cada qual mostrado em relação com os outros no conjunto do corpo feminino. A ordem harmoniosa é enfatizada ainda mais pela forte simetria bilateral entre os órgãos. O desenho contém diversos erros anatômicos, em parte porque se baseia amplamente em dissecções de animais.[36] Porém, como assinalou Johannes Nathan, “isso nada é em comparação com a capacidade [de Leonardo] de transmitir a complexidade do corpo humano com grande clareza, mesmo quando fornece uma enorme quantidade de informações”.[37]

Essa busca de harmonia e síntese anatômica se complica pelo fato de a ciência da anatomia ser, por definição, baseada na separação analítica das partes do corpo. Com efeito, nos desenhos anatômicos de Leonardo, notamos uma tensão entre representações de conjunto, em que as partes do corpo aparecem numa imagem única dentro de um todo integrado, e as representações de partes individuais.

Essa tensão é explorada numa fascinante monografia de Domenico Laurenza intitulada *The Search for Harmony: Anatomical Representations in the Renaissance*.[38] Laurenza mostra que o contraste entre representações de conjunto e isoladas não é característico apenas da anatomia renascentista como um todo: já existia na Antiguidade. Aristóteles, o autor clássico mais conhecido pelos estudiosos do Renascimento, escreveu vários tratados biológicos, inclusive *Historia Animalium* (“História dos Animais”) e *De Partibus Animalium* (“Sobre as Partes dos Animais”). Nesta última obra, ele discute os órgãos internos dos animais, mas sempre de uma perspectiva de conjunto. Aristóteles introduz ainda a distinção entre partes simples (ossos, tendões etc.) e partes compostas do corpo (cabeça, braços, pernas etc.), que foi amplamente adotada nos séculos seguintes.

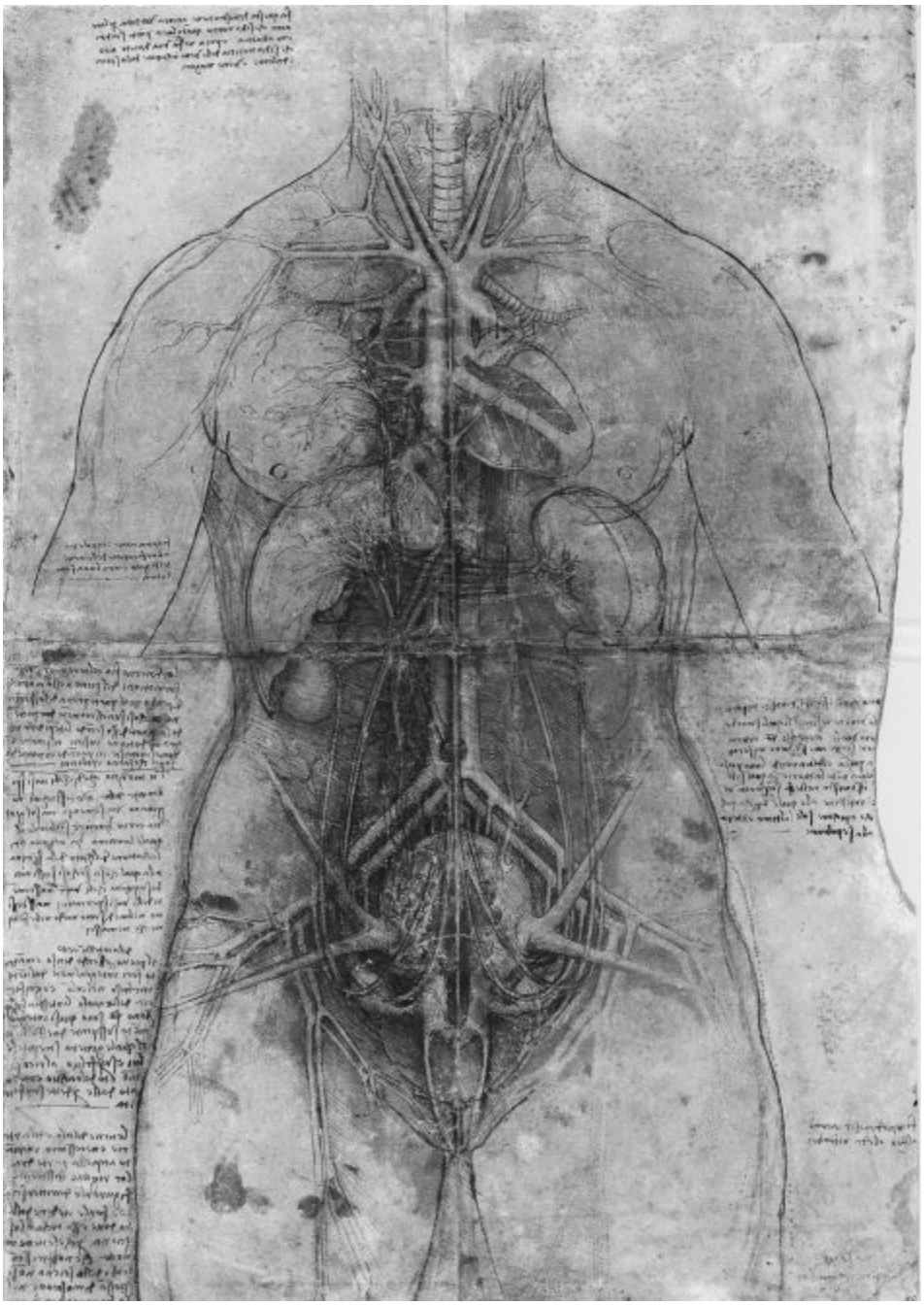


Figura 4-5: *Visão de conjunto dos órgãos internos do corpo feminino, c. 1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 122r.*

O auge do conhecimento anatômico na Antiguidade foi alcançado no século II d.C., com Galeno (Claudius Galenus), autor de mais de uma centena de tratados onde resumiu o conhecimento médico de sua época em consonância com

suas próprias teorias, baseadas parcialmente em dissecções de animais.[39] A distinção entre representações de conjunto e isoladas aparece em duas obras de Galeno: *De Usu Partium* (“Sobre a Função das Partes”) reflete a abordagem sintética, enquanto *De Anatomicis Administrationibus* (“Sobre os Procedimentos Anatômicos”) representa a abordagem analítica. No entanto, como Laurenza observa, essa última obra não estava disponível aos humanistas italianos.

A bíblia médica durante a Idade Média e o Renascimento era o *Cânone de Medicina*, escrito pelo médico e filósofo Avicena (Ibn Sina) no século XI, uma vasta enciclopédia que codificava o conhecimento médico completo dos gregos e árabes.[40] Como se esperaria de um dos mais destacados intérpretes medievais de Aristóteles, a abordagem anatômica de Avicena também era largamente sintética e composta.

O terceiro texto influente sobre anatomia na Renascença, além dos tratados de Galeno e do *Cânone* de Avicena, era a *Anatomia* de Mondino de’ Luzzi, um professor de Bolonha no século XIV que foi um dos poucos mestres medievais a realmente fazer dissecções por conta própria. Embora a *Anatomia* de Mondino fosse um guia prático de dissecções e, portanto, um livro de tipo diferente, ele ainda assim enfatizou que a dissecção devia começar pelo conhecimento do corpo como um todo.

Leonardo estudou as obras de Galeno, Avicena e Mondino, os três principais luminares médicos da época.[41] Como ele sempre procurasse entender as formas orgânicas da natureza em termos de suas relações, padrões e contextos, não é de surpreender que fosse levado à

abordagem de conjunto da anatomia, enfatizada por essas três autoridades. Laurenza demonstra, com abundância de detalhes, que a tensão entre análise (dissecção) e síntese (recomposição) aparece em todo o *corpus* da obra anatômica de Leonardo. Repetidamente, as representações analíticas pormenorizadas de ossos, músculos e nervos são depois refeitas em imagens sintéticas mais completas. Em várias ocasiões, lembretes verbais relativos a futuras reconfigurações são acrescentados à margem dos desenhos de partes separadas.

Não raro, Leonardo produz imagens de uma composição sequencial em que um membro é sucessivamente "vestido" com seus elementos anatômicos, dos ossos à pele. A Figura 4-6, um estudo do suprimento de sangue para a parte superior da perna, constitui exemplo típico. Os vasos sanguíneos femorais e suas ramificações são mostrados em relação com o fêmur, enquanto o conjunto do fêmur e seus vasos aparece dentro do contorno da coxa e em relação com a parte inferior da perna inteira. Outras vezes, uma sequência de ossos, músculos, nervos e vasos sanguíneos pode ser integrada numa única representação. A Figura 4-7, por exemplo, registra a anatomia superficial do pé e da parte inferior da perna em relação com a panturrilha completa.[42]

Figura 4-6: *Estudo de suprimento sanguíneo para a parte superior da perna, c. 1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 112r.*

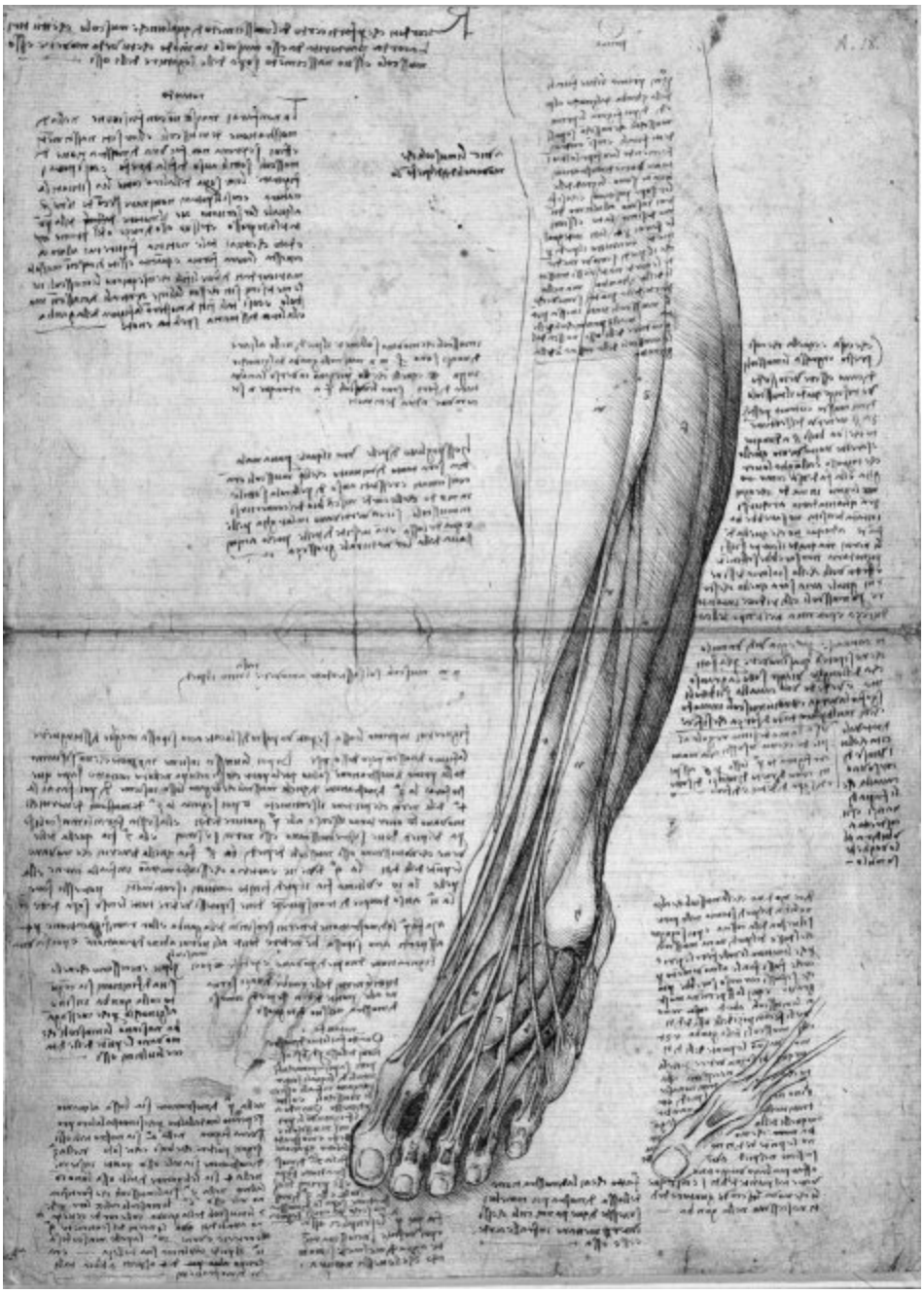


Figura 4-7: *Estudo dos músculos anteriores da perna, c. 1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 151r.*

LEONARDO E VESÁLIO

Durante a primeira metade do século XVI, a ênfase nas representações anatômicas de conjunto, que atingiu o ponto

alto nos desenhos de Leonardo, foi retomada por vários anatomistas italianos;[43] mas, em meados desse século, a balança pendeu, das representações compostas e sintéticas, para as isoladas e analíticas. O auge da tradição analítica foi alcançado em 1543, 24 anos após a morte de Leonardo, com a publicação do famoso livro *De Humani Corporis Fabrica* (“A Estrutura do Corpo Humano”) pelo célebre anatomista flamengo André Vesálio.[44]

A *Fabrica*, como a obra se tornou conhecida, é um magnífico volume com mais de duzentas ilustrações anatômicas baseadas em dissecções de corpos humanos e animais, organizado em sete “livros” (capítulos) segundo as categorias anatômicas: ossos, músculos, vasos sanguíneos, nervos etc. As ilustrações vêm acompanhadas de longas descrições e de um complexo sistema de referências cruzadas entre os traços anatômicos reproduzidos e o texto impresso. O livro é visto como um marco na história da imprensa e da tipografia. A habilidosa mescla de imagens e texto estabeleceu um novo padrão para as ilustrações científicas, que vigoraria por séculos.

As pranchas da *Fabrica* são exemplos notáveis da arte da gravura no século XVI. Vesálio contratou vários artistas para produzi-las, provavelmente do ateliê do famoso pintor veneziano Ticiano, não longe da Universidade de Pádua, onde Vesálio ensinava anatomia na época.[45] Além disso, alguns desenhos eram sem dúvida obra do próprio autor. Depois de sua publicação em Basileia, no ano de 1543, o livro logo conquistou fama por toda a Europa. Enquanto os desenhos anatômicos de Leonardo permaneciam escondidos, a *Fabrica* era elogiada como a primeira obra

importante de anatomia baseada em dissecções reais, garantindo a Vesálio o título de pai da anatomia moderna.

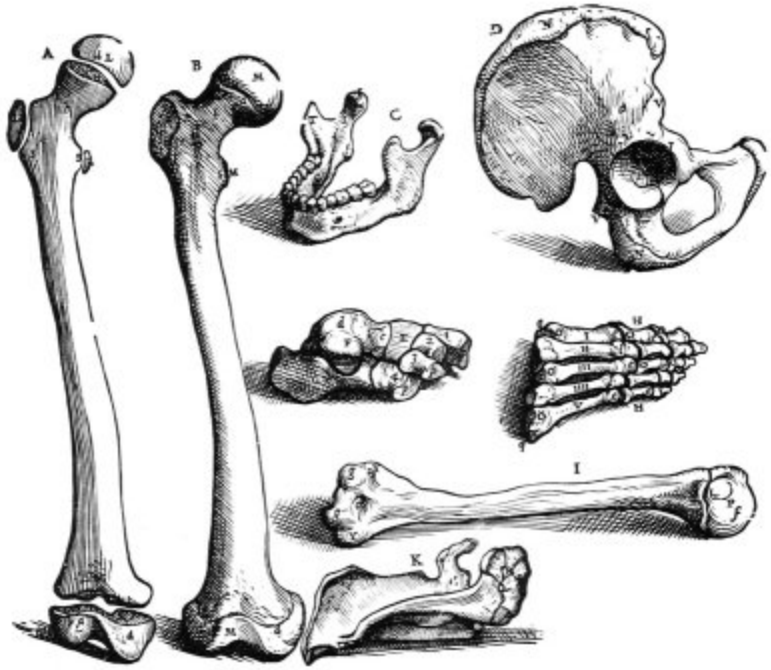


Figura 4-8: *Representações isoladas do esqueleto humano, André Vesálio, De Humani Corporis Fabrica, Livro I; extraído de Saunders e O'Malley, 1950.*

Como mostra Laurenza detalhadamente em sua monografia, Leonardo e Vesálio personificam pontos extremos da tensão entre representações anatômicas compostas e isoladas.[46] Enquanto Leonardo nos mostra, digamos, um sistema de vasos sanguíneos em relação com os ossos adjacentes e em proporção com o resto do corpo, Vesálio se concentra na análise das partes anatômicas individuais, tratando cada sistema anatômico *per se*. Na *Fabrica*, os ossos aparecem completamente isolados dos outros sistemas (ver Fig. 4-8), da mesma forma que o sistema muscular (Fig. 4-9) e a rede de vasos sanguíneos (Fig. 4-10). O sistema de artérias é mostrado sem relação com o coração, este visto juntamente com os pulmões em

outra parte da obra. Os pulmões, por sua vez, estão isolados da traqueia e dos brônquios. O cérebro surge separado dos nervos, já discutidos em seção anterior.[47]

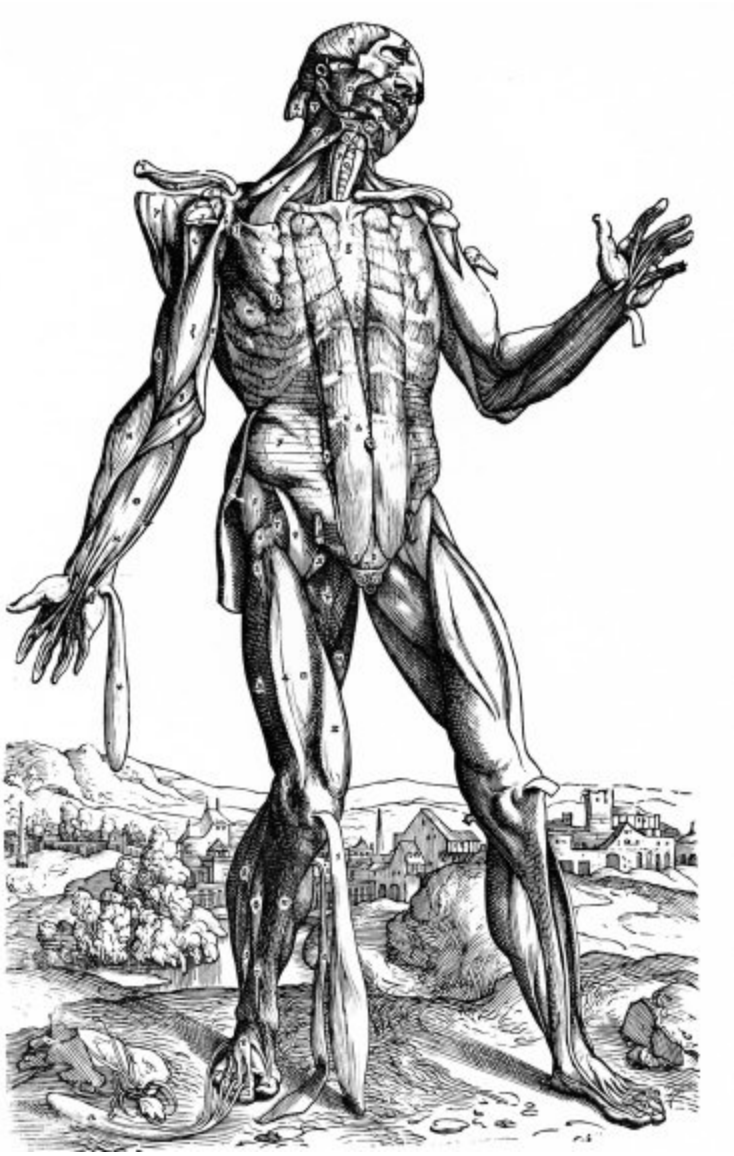


Figura 4-9: *Sistema muscular apresentado por partes, André Vesálio, De Humani Corporis Fabrica, Livro II; extraído de Saunders e O'Malley, 1950.*

Em todas as ilustrações, o limite externo do corpo, fundamental para a visão sintética, desapareceu completamente. "O resultado, no fim", conclui Laurenza, "é

uma visão analítica, desconexa, fragmentária. A síntese visual é toda virtual, deixada à imaginação e à boa vontade do leitor”.[48]

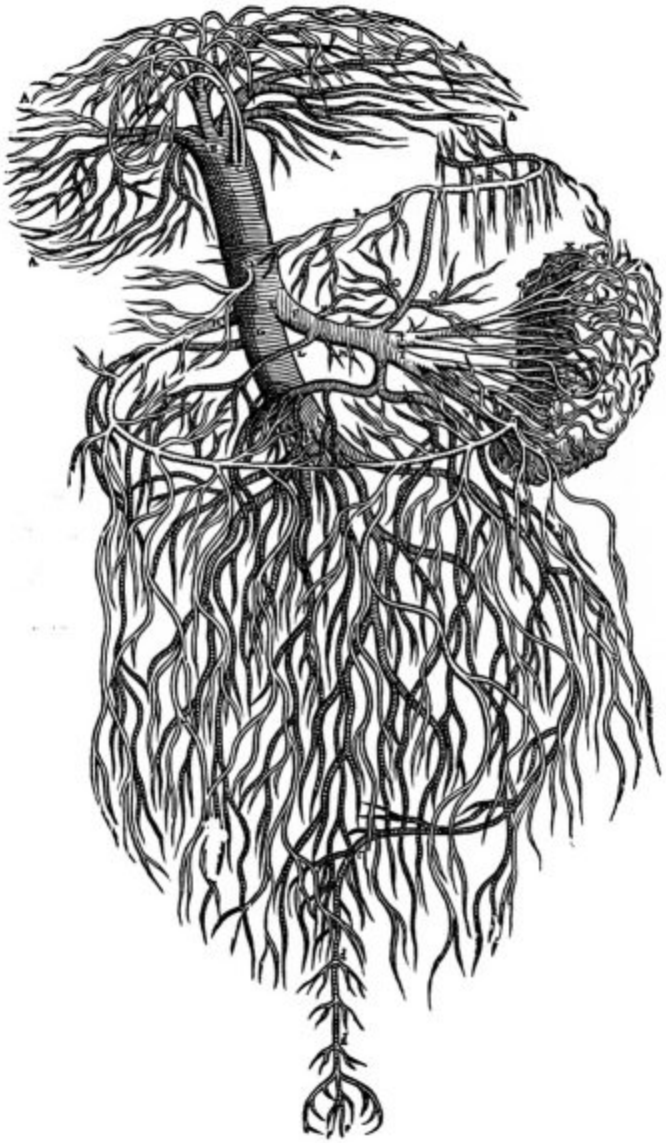


Figura 4-10: *Representação isolada do sistema porta venoso, André Vesálio, De Humani Corporis Fabrica, Livro III; extraído de Saunders e O’Malley, 1950.*

Em consequência dessa abordagem analítica radical, as ideias de beleza, simetria e proporção estão quase inteiramente ausentes da *Fabrica*. Para atenuar o efeito frio

e macabro de suas figuras, Vesálio às vezes instruía o artista a apresentá-las em poses clássicas, contra um fundo de paisagens agradáveis (ver Fig. 4-9). Leonardo não precisava desses embelezamentos. Harmonia, beleza e senso de "vivacidade" caracterizam todas as suas figuras anatômicas.[49] Em minha opinião, isso é resultado do fato de a ciência de Leonardo, no geral, ser uma ciência de formas vivas, orgânicas. O grande tema unificador de sua obra científica, em qualquer campo, é essa busca persistente de compreensão da natureza da vida.[50]

A *Fabrica* de Vesálio teve influência decisiva nas ilustrações anatômicas posteriores. Nos anos que se seguiram à sua publicação, inúmeros plágios e cópias grosseiras das pranchas apareceram em livros de anatomia por toda a Europa. Desde então, o estilo dominante das representações anatômicas passou a ser vesaliano: analítico, não composto e sintético. Essa tendência persistiu até os dias de hoje. Como observa Laurenza:

> A visão e a representação compostas correspondem à atual anatomia topográfica, um ramo dos estudos anatômicos que, aos olhos dos alunos de medicina, não passa às vezes de matéria para consideração secundária. O verdadeiro modelo dos estudos e representações anatômicas é o do tipo analítico. [Assim], a medicina e a cirurgia modernas encaram a doença como uma afecção de determinado órgão, não do organismo como um todo.[51]

Leonardo, surpreendentemente, parece ter antecipado os riscos de semelhante reducionismo. Nos Estudos Anatômicos, enfatiza o tempo todo a necessidade de um "conhecimento integral" (*cognizione integrale*) e denuncia as representações isoladas de partes anatômicas individuais como uma "coisa monstruosa" (*cosa mostruosa*).[52]

Especialmente reveladora é sua famosa polêmica com os "compendiadores", dirigida contra todos aqueles que elaboravam resumos, ou epítomes, de textos longos e complexos, e também contra alguns anatomistas da época. A polêmica está num fólio de anotações anatômicas da Coleção Windsor[53] e, num fólio anterior, Leonardo se refere especificamente aos "estudantes obstrucionistas de anatomias e compendiadores delas".[54] Em suma, Leonardo criticava o modo como certos professores e alunos conduziam dissecções, recriminando-os pelos "compêndios", ou falta de integração, em seus estudos anatômicos.

Para o leitor moderno, a importância desse "discurso contra os compendiadores" vai muito além do campo da anatomia. "Os compendiadores de obras", declarou ele, "ofendem o conhecimento e o amor (...). Que mérito tem o estudioso que, para resumir trechos das coisas das quais pretende dar plena ciência, deixa de lado a maior parte daquilo de que o todo é composto? (...) Ó estupidez humana! (...) Não vês que incides no mesmo erro de quem despoja uma árvore de seu adorno de galhos e folhas, misturados a flores e frutos perfumados, a fim de demonstrar que essa árvore é boa para fazer tábuas?".[55]

Essa declaração não apenas dá testemunho do pensamento sistêmico e do profundo senso de harmonia de Leonardo como é assustadoramente profética. Reduzir a beleza da vida às partes mecânicas e valorizar as árvores somente por sua madeira é uma triste caracterização da mentalidade que ainda domina o mundo. Como enfatizei em

A Ciência de Leonardo da Vinci, isso torna o legado de Leonardo ainda mais relevante para o nosso tempo.[56]

CAPÍTULO 5

Os elementos da mecânica

Ao estudar, desenhar e pintar “todas as formas da natureza”, Leonardo investigava não apenas suas qualidades e proporções externas, mas também as forças que as tinham moldado e não cessavam de transformá-las. Vislumbrou padrões similares no macrocosmo e no microcosmo, mas suas cuidadosas pesquisas desses padrões de organização fizeram-no perceber que as forças por trás deles eram bem diferentes.

Depois de minuciosos estudos da água corrente, Leonardo reconheceu com acerto que a gravidade e o atrito interno do fluido, ou viscosidade, eram as duas principais forças atuantes em seus movimentos.[1] E, graças a observações atentas das formações rochosas, identificou a água como o principal agente na formação da superfície terrestre.[2] Além disso, indagou sobre a natureza das forças tectônicas que faziam camadas de rocha sedimentar emergir do fundo do mar para formar montanhas.[3]

Estudando as plantas e os animais, Leonardo concluiu que a alma era a energia vital de sua formação e crescimento. Na esteira de Aristóteles, concebeu a alma como constituída por níveis sucessivos, correspondentes

aos da vida orgânica. O primeiro nível é a “alma vegetativa”, que controla os processos metabólicos do corpo. A alma das plantas é restrita a esse nível metabólico de força vital. A próxima forma hierarquicamente superior é a “alma animal”, caracterizada pelo movimento autônomo no espaço e por sensações de prazer e dor. Finalmente, a “alma humana”, inclui as almas vegetais e animais, mas sua característica principal é a razão.

A FUNÇÃO “NOBRE” DA MECÂNICA

Os movimentos autônomos, voluntários do corpo humano fascinavam Leonardo e se tornaram um tema de destaque em sua obra anatômica. Ele rastreou a transmissão das forças responsáveis pelos vários movimentos do corpo a partir de sua origem no centro do cérebro (a “sede da alma”), ao longo dos nervos motores centrais e periféricos, até os músculos, tendões e ossos.[4] Leonardo dizia que ossos, tendões e músculos eram os “instrumentos mecânicos” da natureza, imprescindíveis para os movimentos corporais e, por isso, mais bem compreendidos em termos das leis e princípios da “ciência mecânica”.[5]

Desde os tempos de seu aprendizado como artista e engenheiro em Florença, Leonardo conhecia os princípios básicos da mecânica aplicada a máquinas simples – alavancas, hélices, cunhas, roldanas, balanças etc. Posteriormente, usou esses princípios em invenções de máquinas e aparelhos mecânicos mais complexos. Mas foi em Milão, onde desenvolveu um forte interesse pela matemática e operou a transição da engenharia para a

ciência, que ele se sentiu motivado a estudar mecânica com mais empenho e em maior profundidade.[6]

Na época, Leonardo começara a pesquisar os movimentos do corpo humano e descobrira uma função mais ampla e mais "nobre" para a ciência da mecânica. "A ciência instrumental ou mecânica", escreveria mais tarde no Codex sobre o Voo dos Pássaros, "é nobilíssima e mais útil que qualquer outra. É que, por meio dela, os corpos animados e dotados de movimento realizam todas as suas operações".[7] O contraste entre essa declaração e os pronunciamentos dos arquitetos de visão mecanicista dos dois séculos subsequentes é bastante notável. Para Descartes, Bacon e Newton, o objetivo supremo da ciência da mecânica era o domínio da natureza pelos humanos. Para Leonardo, era a compreensão e a imitação (no caso do voo dos pássaros) do corpo animal em movimento.

A fim de entender em minúcia como os "instrumentos mecânicos" da natureza colaboram para mover o corpo, Leonardo mergulhou no estudo de problemas que envolviam pesos, forças e movimentos. Mostrou que as articulações funcionavam como dobradiças, os tendões como cordas e os ossos como alavancas. Estudando os princípios elementares da mecânica em relação aos movimentos do corpo humano, ele os aplicou também ao desenho de numerosas máquinas novas; e, à medida que seu fascínio pela ciência da mecânica crescia, passava a explorar tópicos ainda mais abstratos, muitas vezes se debatendo com questões conceituais que só seriam plenamente entendidas séculos após sua morte.

O CORPO É UMA MÁQUINA?

Em vista das brilhantes realizações de Leonardo na engenharia mecânica e de suas amplas aplicações dos princípios da mecânica aos "instrumentos mecânicos" do corpo, é tentador – mas, a meu ver, errôneo – concluir que para ele o corpo humano todo era uma máquina. Muitos estudiosos de Leonardo assumiram, implícita ou explicitamente, essa postura. Kenneth Keele, por exemplo, em sua exaustiva análise do *corpus* leonardiano de estudos anatômicos, publicada em 1983, fala constantemente em "máquina humana", ao que parece parafraseando Leonardo.[8]

Uma década depois, Paolo Galluzzi perfilhou essa tese em seu magnífico volume *Renaissance Engineers: From Brunelleschi to Leonardo da Vinci*, uma de cujas seções, sobre os estudos anatômicos de Leonardo, traz o título de "O corpo humano como uma máquina maravilhosa".[9] Nos primeiros parágrafos dessa seção, Galluzzi cita a frase de Leonardo segundo a qual "a natureza não pode dar movimento aos animais sem instrumentos mecânicos"[10] e acrescenta o seguinte comentário:

> Leonardo procurou demonstrar a estreita analogia entre a máquina e o corpo. Via ambos como realizações maravilhosas da Natureza em que leis férreas governam não apenas os instrumentos mecânicos, mas também os movimentos dos animais.

Discordo das afirmações de Keele, Galluzzi e outros historiadores de que Leonardo utilizou uma abordagem mecanicista em seus estudos anatômicos e via o corpo humano como uma máquina. Acho que semelhante conclusão se baseia numa duvidosa interpretação

cartesiana dos escritos de Leonardo. Significa projetar um modelo reducionista e mecanicista do corpo humano em sua visão do macrocosmo e do microcosmo – visão absolutamente orgânica e alheia à cisão mente-corpo introduzida por Descartes mais de cem anos após a morte de Leonardo.

René Descartes alicerçou sua visão da natureza numa divisão fundamental em duas esferas separadas e independentes: a do espírito e a da matéria.[11] O universo material é uma máquina e nada mais que uma máquina. A natureza trabalha estritamente de acordo com leis mecânicas; tudo no mundo material pode ser explicado em termos de disposição e movimentos de suas partes. Descartes estendeu essa visão mecanicista da matéria aos organismos vivos. Plantas e animais, para ele, não passam de máquinas. Os seres humanos são dotados de uma alma racional, de origem divina. O corpo humano, porém, age como simples autômato, indistinguível de um animal-máquina. O corpo está completamente separado do espírito e a única conexão entre os dois existe por intervenção de Deus.

Há uma diferença profunda na maneira como Descartes e Leonardo viam os organismos vivos. Para Leonardo, a natureza capacita os animais a mover-se com a ajuda de "instrumentos mecânicos", mas isso não quer dizer que os animais sejam máquinas. A diferença crucial está em que, na visão de Leonardo, a alma inerente a todos os organismos vivos dá origem aos movimentos do corpo e é também seu "compositor" (*desso corpo compositore*) ou energia formadora.[12] O conceito de alma de Leonardo da

Vinci difere muito do de Descartes. Para ele, a alma constitui um todo indivisível com o corpo, controlando seus movimentos voluntários e involuntários. O conjunto das atividades da alma não é o mesmo nas plantas, nos animais e nos humanos; aumenta por etapas à medida que aumenta também a complexidade biológica.[13] Sugeri *A Ciência de Leonardo da Vinci* que o conceito aglutinante de alma, sustentado por Leonardo – como agente da percepção e como energia vital responsável pela formação e movimentos do corpo –, embora bem diferente do de Descartes, aproxima-se bastante de nosso moderno conceito de cognição.[14]

"Por que a natureza não pode dar movimento aos animais sem instrumentos mecânicos", escreve Leonardo nos Estudos Anatômicos, "eu o demonstro neste livro sobre os movimentos ativos que ela imprime em seus corpos".[15] Parece bem claro que, aqui, Leonardo se refere aos movimentos voluntários dos animais, conseguidos por meio de instrumentos mecânicos, mas que se originam em sua alma e são por esta controlados – algo muito diferente do animal autômato de Descartes.

Em diversas passagens dos manuscritos, Leonardo se extasia com a beleza e a graça das interações sutis entre os corpos e as almas dos animais. Observa, por exemplo, que os delicados processos cognitivos (como diríamos na moderna linguagem científica) de um pássaro em pleno voo serão sempre superiores aos de um piloto humano manobrando uma máquina voadora:

> Poder-se-ia afirmar que esse instrumento, feito pelo homem, só não possui a alma do pássaro, que deve ser imitada pela alma do homem (...).

> [Entretanto], a alma do pássaro certamente responderá melhor às necessidades de seus membros do que a alma do homem, separada deles e principalmente de seus movimentos de equilíbrio quase imperceptíveis.[16]

Às vezes, surpreendemos até mesmo um fino senso de humor na insistência de Leonardo em que os movimentos dos animais não são puramente mecânicos. “A natureza não busca contrapesos quando faz órgãos próprios para o movimento nos corpos dos animais”, brinca ele em outro fólio dos Estudos Anatômicos, “mas coloca no corpo a alma, o compositor desse corpo”.[17] Mais importante ainda, essa passagem é uma clara afirmação da natureza aglutinante da alma como motor e compositor do corpo.

Considerando-se as passagens acima citadas, tanto quanto a na tureza geral de sua ciência como estudo das qualidades e transformações das formas orgânicas, parece evidente que a abordagem anatômica de Leonardo não era mecanicista, ou pelo menos não no sentido cartesiano. Ele entendeu perfeitamente que as anatomias dos animais e dos humanos pressupõem funções mecânicas – e isso se tornou a motivação principal para seus incansáveis estudos da “ciência mecânica”. Todavia, esses estudos estavam sempre inseridos num quadro conceitual orgânico mais amplo.

Ocasionalmente, Leonardo se referia a sistemas anatômicos intricados como “máquinas”. Em dois fólios dos Estudos Anatômicos – um que mostra o feixe de músculos responsáveis pelos movimentos complexos da cabeça e o outro que descreve os músculos superficiais da coxa –, ele usa a expressão “esta nossa máquina”, em súbitos arroubos de êxtase e perplexidade ante a sofisticação do corpo,

inserida entre detalhadas descrições anatômicas.[18] Nas duas frases, o termo “máquina” se aplica a um sistema complexo de funções mecânicas, não ao corpo como um todo.

Em outras ocasiões, Leonardo recorre à palavra “máquina” para se referir a fenômenos do macrocosmo. Chama a água de “humor vital da máquina terrestre”,[19] e o fluxo e refluxo das marés de “respiração desta máquina da Terra”.[20] Fica claro que, também aqui, não se deve atribuir a “máquina” uma acepção cartesiana: o termo se refere, sem dúvida, a um sistema vivo complexo, nutrido pela água, com as marés se movendo ritmicamente tal qual a respiração e o fluxo sanguíneo no corpo humano – e animado por uma energia vital de crescimento ou “alma vegetativa”.[21]

Leonardo da Vinci elaborou uma síntese única de arte, ciência e desenho.[22] Era um gênio que inventou incontáveis máquinas e aparelhos mecânicos, sempre preservando um forte interesse pela teoria da mecânica durante a maior parte de sua vida adulta. No todo, porém, sua ciência nunca foi mecanicista. Via o mundo como uma variedade infinita de formas vivas continuamente moldadas por processos intrínsecos e de padrões de organização aplicáveis ao macrocosmo e ao microcosmo. Formulava modelos mecânicos quando pressentia que eles o ajudariam a entender os fenômenos naturais; mas, ao contrário de muitos cientistas de séculos posteriores, nunca considerou o mundo e muito menos o corpo humano como simples máquinas.

AS MÁQUINAS DE LEONARDO

Ao longo de sua vida adulta, e especialmente durante os anos que passou na corte dos Sforza, em Milão,[23] Leonardo ficou famoso não apenas como artista, mas também como engenheiro mecânico. Seus deveres como pintor da corte e "engenheiro ducal" incluíam, além da execução de retratos ou da montagem de peças teatrais e cortejos, toda uma variedade de pequenos trabalhos de engenharia que exigiam habilidade e conhecimento no manejo dos materiais. Os múltiplos talentos criativos de Leonardo se prestavam maravilhosamente a semelhantes tarefas. Ele inventou vários e espantosos aparelhos nessa época, que estabeleceram para sempre sua reputação de engenheiro-mágico da corte.

Entre suas invenções contam-se portas que se abriam e fechavam automaticamente por meio de contrapesos; uma lâmpada de mesa de intensidade variável; móveis dobráveis; um espelho octogonal que gerava um número infinito de imagens; e um espeto engenhoso, no qual "a carne girará devagar ou depressa, conforme o fogo for moderado ou forte".[24]

Leonardo não restringiu suas habilidades de engenheiro a esses brinquedos, mas inventou várias máquinas de natureza industrial, entre elas equipamentos têxteis para fiar, tecer, trançar cânhamo, aparar feltro e fazer agulhas – e outras para fundir e malhar metais, desbastar madeira e pedras, trefilar, cunhar e triturar, ou seja, máquinas para as indústrias básicas de sua época.

Um tipo especial de máquinas foram os instrumentos de mensuração que ele concebeu e desenhou para seus

experimentos científicos.[25] Fez, sobretudo, várias tentativas de aperfeiçoar mecanismos de relógios para a medida do tempo, que estava ainda no início em sua época. No Codex Madri I, Leonardo apresenta uma exposição sistemática dos principais componentes de um relógio mecânico – o uso da mola como força propulsora e do fuso (um tambor cônico) para compensar a força decrescente da mola, as transmissões de força por intermédio de rodas dentadas e várias formas de sistemas de regulação conhecidos como escapos. Todos esses elementos são discutidos em detalhe e mostrados em magníficos desenhos que cobrem diversas páginas.[26]

Além da engenharia mecânica, Leonardo se dedicou também com entusiasmo à engenharia civil e militar. Era conhecido como um dos melhores engenheiros hidráulicos da Itália e, durante seus anos na corte dos Sforza, provavelmente se encarregou de todas as obras hidráulicas na Lombardia.[27] Aperfeiçoou os sistemas de diques existentes, inventou máquinas especiais para abrir canais e construiu pequenas barragens em rios para evitar danos às propriedades ribeirinhas.

Um de seus projetos hidráulicos mais ambiciosos, mas que não chegou a realizar, foi o de um canal navegável entre Florença e Pisa. Leonardo calculava que esse canal iria proporcionar irrigação a terras secas e serviria também como recurso “industrial”, fornecendo energia a numerosos moinhos produtores de seda e papel, acionando tornos de oleiro, serrando madeira e malhando metais.[28]

Como engenheiro militar, Leonardo era frequentemente consultado sobre estratégias de guerra e muitas vezes

respondeu com engenhosos desenhos de novas fortificações e grandiosos planos para represar ou desviar rios a fim de conter tropas inimigas.[29] Boa parte de seu trabalho para chefes militares consistiu no desenho de estruturas que defendessem e preservassem cidades ou aldeias.[30] No entanto, projetou também extravagantes máquinas de destruição – bombardas, projéteis explosivos, catapultas, bestas gigantescas e coisas semelhantes. Ao mesmo tempo, paradoxalmente, condenava com veemência a guerra, que chamava de “a loucura mais bestial” (*pazzia bestialissima*). Várias explicações para essa aparente contradição podem ser sugeridas.[31] Leonardo estava sempre necessitado de uma renda estável que lhe permitisse prosseguir com as pesquisas científicas e recorria às suas invejáveis habilidades em engenharia mecânica para garantir a independência financeira oferecendo projetos de assombrosas máquinas de guerra. Além disso, talvez tivesse consciência de que boa parte desses projetos fantasiosos jamais se concretizaria.

Mas fica claro também, pela leitura dos cadernos de notas, que os engenhos bélicos destrutivos fascinavam Leonardo, provavelmente da mesma maneira como o fascinavam os cataclismos e desastres naturais. Talvez não possamos resolver a contradição entre seu pacifismo e seus serviços como engenheiro militar, mas temos de aceitá-la como uma das muitas que caracterizam a personalidade complexa de um grande gênio.[32]

As notáveis contribuições de Leonardo à engenharia mecânica, civil e militar são discutidas pormenorizadamente em diversas obras, inclusive o belo livro *Renaissance*

Engineers from Brunelleschi to Leonardo da Vinci, do historiador da ciência Paolo Galluzzi,[33] e o volumoso catálogo de uma exposição do Musée des Beaux-Arts de Montreal, editado por Galluzzi, que cobre em minúcia tanto a engenharia quanto a arquitetura de Leonardo.[34] Seus desenhos técnicos são frequentemente exibidos pelo mundo todo, não raro suplementados por modelos de madeira que mostram nos mínimos detalhes como Leonardo pretendia que funcionassem.[35] A combinação de artista e engenheiro não era incomum no Renascimento.[36] Por exemplo, o mestre de Leonardo, Verrocchio, foi ourives, escultor e pintor muito famoso, além de renomado engenheiro. O grande arquiteto renascentista Brunelleschi se destacou primeiro em Florença como escultor e mais tarde, já célebre como arquiteto, passou a ser aclamado também por seu gênio criador em engenharia. O jovem Leonardo o admirava muito e reconheceu sua dívida para com o grande arquiteto desenhando vários dos aparelhos de suspender cargas e plantas arquitetônicas de Brunelleschi.

O que, porém, tornou Leonardo único como engenheiro foi o fato de vários de seus desenhos inovadores, apresentados nos cadernos de notas, pressuporem avanços tecnológicos só conseguidos séculos depois. Mais importante ainda, ele foi o único entre os famosos engenheiros renascentistas que operou a transição da engenharia para a ciência. Saber *como* uma coisa funcionava não era o bastante para ele; tinha também de saber *por quê*. Assim, pôs-se em marcha um processo inevitável que o conduziu da tecnologia e da engenharia à ciência pura. Como nota o historiador da arte Kenneth Clark,

podemos surpreender o processo em andamento nos manuscritos de Leonardo:

> Primeiro, há questões sobre a construção de certas máquinas e depois (...) questões sobre os primeiros princípios da dinâmica; finalmente, questões que nunca tinham sido colocadas antes sobre ventos, nuvens, idade da Terra, geração, coração humano. A simples curiosidade se transformou em profunda pesquisa científica, independente dos interesses técnicos que a precederam.[37]

A transição de Leonardo do estudo da tecnologia empírica medieval para a mecânica teórica começou com o surgimento de um profundo interesse pela matemática durante seus primeiros anos em Milão, quando ele estava por volta dos 30 anos. Um acontecimento importante foi a visita à cidade vizinha de Pavia, em 1490. Leonardo viajou até lá em companhia do arquiteto Francesco di Giorgio a serviço do duque de Milão, para inspecionar obras na catedral local.

Em Pavia, Leonardo conheceu o matemático Fazio Cardano, especialista na “ciência da perspectiva”, que na Renascença incluía a geometria e a óptica geométrica. As conversas de Leonardo com Cardano acenderam nele uma paixão pela matemática que não se extinguiria nem com a idade avançada.[38] O colega arquiteto e engenheiro, Francesco, regressou a Milão tão logo terminaram os trabalhos, mas Leonardo permaneceu em Pavia por mais seis meses a fim de consolidar seu conhecimento de geometria em estudos na magnífica e mundialmente famosa biblioteca da cidade.[39]

Logo após sua volta a Milão, iniciou mais dois cadernos de notas, hoje conhecidos como Manuscritos A e C, onde aplicou seu novo conhecimento de geometria ao exame

sistemático da perspectiva e da óptica, bem como a problemas elementares de mecânica. Seu emprego do ra - ciocínio geométrico na análise de máquinas foi altamente original. Inspirado talvez pelas discussões sobre o célebre tratado de Euclides, *Elementos de Geometria*, que travara com Cardano em Pavia, começou a isolar mecanismos individuais, ou "elementos", das máquinas onde estavam instalados. Essa separação conceitual só voltaria a ocorrer na engenharia durante o século XVIII.[40]

Na época, Leonardo planejava (e pode mesmo ter escrito) um tratado inteiro sobre os *Elementos das Máquinas*, no qual usaria a ciência geométrica para analisar mecanismos básicos em termos de princípios elementares de mecânica – a transmissão de força e movimento, a medição de forças etc. Ele considerava essa análise importante não apenas para compreender e aperfeiçoar mecanismos existentes, mas também para cumprir o "mui nobre" propósito de determinar as ações individuais dos músculos, tendões e ossos na geração dos movimentos do corpo.[41]

O tratado de Leonardo sobre os *Elementos das Máquinas*, se é que chegou a ser escrito, perdeu-se. Mas seu Codex Madri I contém extensos estudos preparatórios para essa obra. Redigido no final dos anos 1490, enquanto Leonardo completava *A Última Ceia*, traz a análise de mais de duzentos mecanismos elementares em incontáveis variações – sarilhos, alavancas, dobradiças, engates, rodas dentadas, polias etc. Como mostrou o historiador da tecnologia Ladislao Reti em sua bela e abrangente análise do Codex Madri, os elementos de máquinas de Leonardo

incluíam todos os dispositivos mecânicos descritos na obra dos eruditos franceses da École Polytechnique no início do século XIX, considerada tradicionalmente o primeiro estudo sistemático dos mecanismos elementares.[42]

Os mecanismos descritos no Codex Madri eram bem conhecidos dos engenheiros renascentistas, embora Leonardo inventasse muitas versões e combinações novas para eles. Todavia, nenhum de seus predecessores ou contemporâneos havia analisado em detalhe o funcionamento desses mecanismos. Durante séculos, animais tinham sido atrelados a carroças ou veículos de tração; homens giraram manivelas, manusearam ferramentas mecânicas e operaram teares. Máquinas simples foram construídas e utilizadas à maneira tradicional, sem que se perguntasse como fazer para reduzir o atrito ou aprimorar a transmissão da força dos músculos.

A abordagem de Leonardo era bem diferente. Ele nunca adotou as soluções tradicionais sem questioná-las, mas sempre as analisou de acordo com regras mecânicas e princípios deduzidos da observação e do experimento. Atentava em especial para a transmissão de força e movimento de um plano a outro, o que era um dos grandes desafios da engenharia renascentista. Um exemplo extremamente complexo é seu desenho de um moinho hidráulico para ao mesmo tempo puxar e girar segmentos de cilindros. A ilustração de Leonardo (Fig. 5-1) mostra uma montagem mecânica de quinze articulações em que a força inicial da turbina de água (embaixo e à esquerda da montagem) é transmitida três vezes entre eixos verticais e horizontais graças à ajuda de rodas dentadas e

engrenagens de rosca sem fim. A cada vez, a força aumenta doze vezes, enquanto a velocidade de giro vai diminuindo gradativamente até alcançar a roda sólida (no alto e à direita da montagem), que pressiona o segmento de cilindro embaixo dela.[43] A transferência de força é claramente mostrada por Leonardo num pequeno diagrama sob o desenho principal, onde as razões numéricas de energia são indicadas para cada engrenagem.

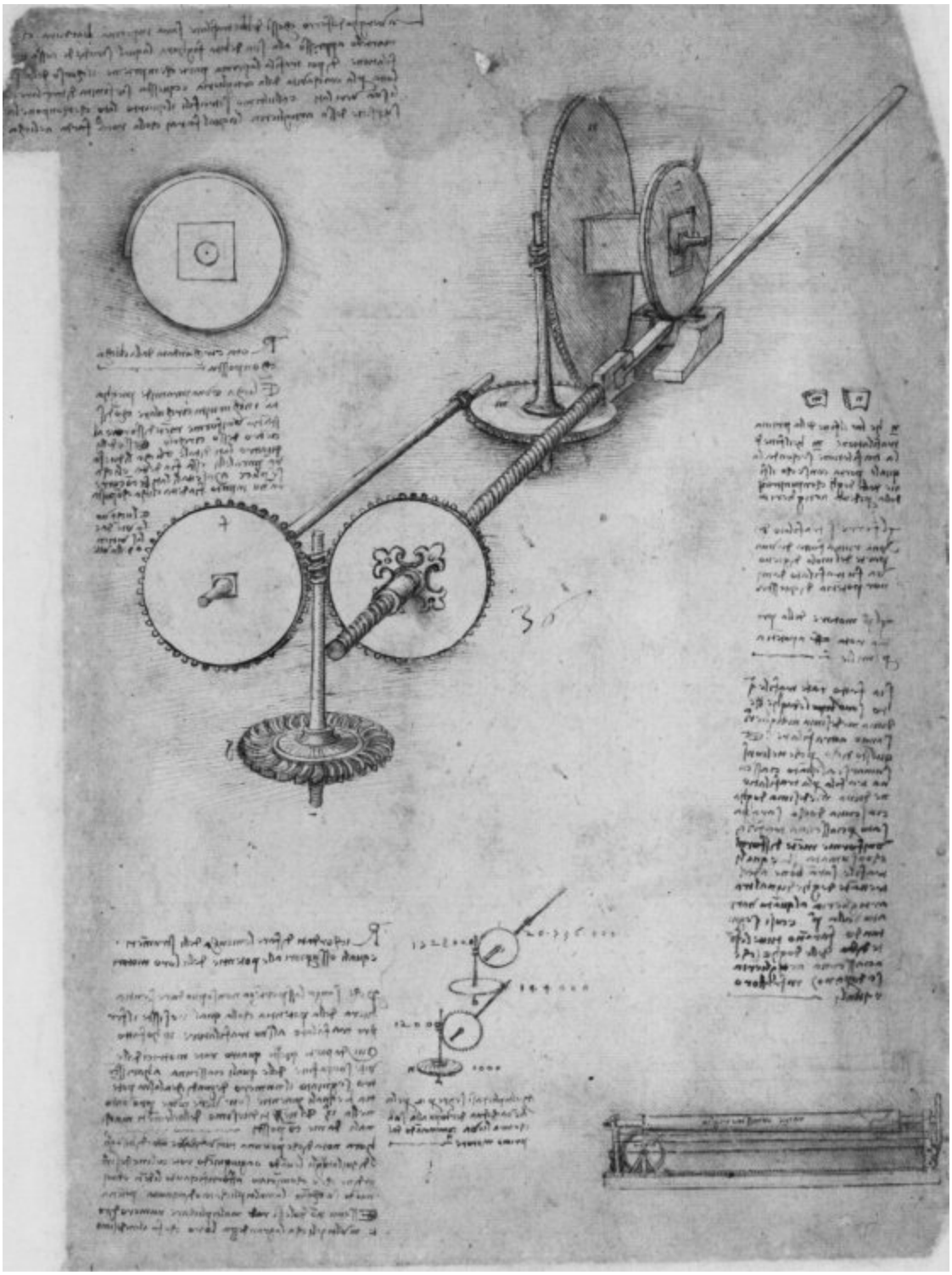


Figura 5-1: *Moinho hidráulico para girar e puxar segmentos de cilindro, Codex Atlanticus, fólio 10r.*

Esse desenho é uma ilustração esplêndida da extraordinária capacidade de Leonardo para coordenar complexas funções mecânicas, analisando-as com exatidão e apresentando-as visualmente com a maior clareza. Desde a época em que passou a se interessar mais por matemática, na Universidade de Pavia, seu trabalho em engenharia mecânica tornou-se inextricavelmente ligado à análise de máquinas em termos de geometria e princípios mecânicos.

A CIÊNCIA DOS PESOS

Leonardo iniciou seus estudos teóricos de mecânica pela "ciência dos pesos", conhecida hoje como estática e que se ocupa da análise dos pesos e forças de sistemas físicos em equilíbrio estático, como balanças e alavancas. Na Renascença, esse conhecimento era tão importante para os arquitetos e engenheiros quanto hoje. A ciência medieval dos pesos compreendia um vasto acervo de obras compiladas no final do século XIII e durante o século XIV, que Leonardo estudou a fundo. Algumas eram tratados e fragmentos traduzidos do grego ou do árabe, geralmente atribuídos a Euclides e Arquimedes, enquanto outros eram escritos originais de autores da Idade Média.[44]

As bases matemáticas da estática foram estabelecidas na Antiguidade pelo grande cientista e matemático Arquimedes, num tratado intitulado *Sobre o Equilíbrio dos Planos*, que contém a determinação exata de centros de gravidade e a prova de sua lei geral da alavanca. As provas matemáticas de Arquimedes eram puramente geométricas,

o que deleitava Leonardo e levou-o a declarar, com entusiasmo, que “a mecânica é o paraíso das ciências matemáticas”.[45]

Quanto aos autores medievais, Leonardo se inspirou muito em duas obras de Jordanus de Nemore, um matemático do século XIII a respeito do qual quase nada se sabe, mas que deixou vários tratados sobre matemática e mecânica onde revela grande habilidade e originalidade. Leonardo leu as duas obras principais de Jordanus sobre estática, *Elementa de Ponderibus* (“Elementos sobre a Ciência dos Pesos”) e *De Ratione Ponderis* (“Sobre a Natureza do Peso”), esta uma versão maior e mais aprofundada daquela.

Bem à sua maneira, Leonardo absorveu as ideias principais dos textos melhores e mais originais do *corpus* da ciência medieval dos pesos, comentou alguns de seus postulados nos cadernos de notas, verificou-os experimentalmente e refutou diversas provas incorretas. O Codex Atlanticus, em particular, contém inúmeras páginas de sua tradução italiana de muitos postulados dos *Elementa* e do *De Ratione Ponderis* de Jordanus, provavelmente feita a partir de um único manuscrito que continha as duas obras.[46]

Leonardo adotou como ponto de partida para seu tratamento ma temático da estática a lei da alavanca, estabelecida por Arquimedes. Ela prescreve que uma alavanca (ou balança) ficará em equilíbrio quando a razão dos dois pesos (ou forças) for o inverso da razão de suas distâncias do fulcro. Essa lei aparece repetidamente, sob várias formas, nos cadernos de notas de Leonardo. No Codex Atlanticus, por exemplo, ele declara:

> A razão dos pesos que mantêm os braços da balança paralelos à linha do horizonte é a mesma dos próprios braços, mas ao inverso.[47]

No Codex Arundel, Leonardo expressa a lei nos termos de uma fórmula que, na moderna notação algébrica, seria escrita como $p_2 = (p_1b_1) / b_2$:

> Multiplique-se o braço mais comprido da balança pelo peso que suporta e divida-se o produto pelo braço mais curto; o resultado será o peso que, colocado no braço mais curto, resiste à descida do braço mais longo, estando os braços da balança em equilíbrio desde o começo.[48]

Leonardo usava a lei da alavanca a fim de calcular as forças e pesos necessários para estabelecer o equilíbrio entre numerosos sistemas simples e compostos como balanças, alavancas, polias e suportes suspensos por cordas. Além disso, analisava cuidadosamente as tensões em vários segmentos das cordas, talvez para calcular tensões similares nos músculos e tendões dos membros humanos.

O historiador da ciência Marshall Clagett comentou em detalhe os diagramas e análises que Leonardo fez dos princípios da estática.[49] Ele enfatiza que Leonardo aplicou a lei da alavanca não apenas a situações em que as forças atuam perpendicularmente aos braços, mas também àquelas em que as forças atuam em vários ângulos. O Codex Arundel e o Manuscrito E contêm numerosos diagramas, de complexidade variada, com pesos que exercem forças em diferentes ângulos por meio de cordas e polias. Leonardo reconheceu que, nesses casos, o importante na lei da alavanca não é o comprimento do braço e sim a distância perpendicular entre a linha da força e o eixo de rotação. Chamou essa distância de “braço de

alavanca potencial” (*braccio potenziale*) e assinalou-a claramente em vários diagramas.

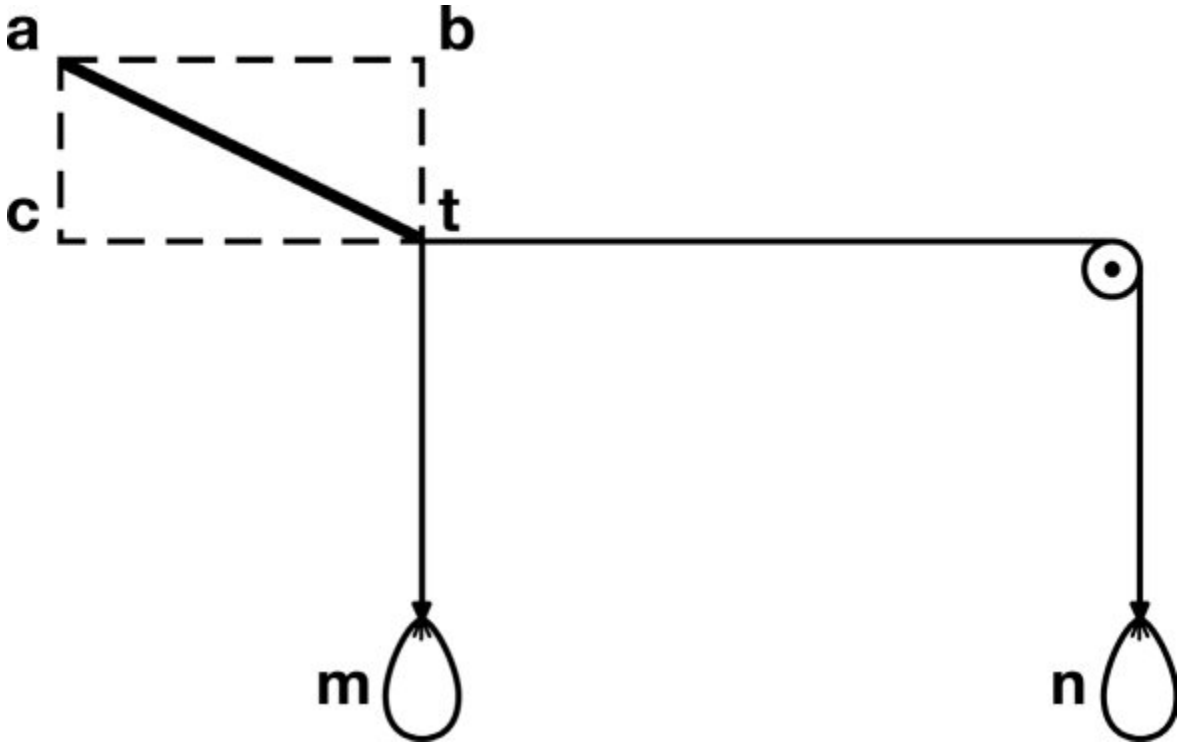


Figura 5-2: *Prancha equilibrada por duas forças atuando em ângulos diferentes, Ms. E, fólio 65r, reconstituição de Clagett.*

No diagrama do Manuscrito E (Fig. 5-2), por exemplo, Leonardo mostra uma barra apoiada em uma das extremidades no ponto *a* e com um peso *m* suspenso da outra extremidade no ponto *t.* Um segundo peso, *n*, exerce tração horizontal por intermédio de uma corda que desliza por uma polia. O problema consiste em determinar os pesos *m* e *n* necessários para manter a barra em equilíbrio. Em sua solução, Leonardo identifica os dois braços potenciais da alavanca como *ab* e *ac*, declarando corretamente que, em equilíbrio, os pesos *m* e *n* serão inversamente proporcionais às distâncias *ab* e *ac*.

Na estática moderna, o braço potencial é conhecido como “braço de momento” e seu produto e força recebem o nome de “momento de força” ou “torque”. Leonardo percebeu, é óbvio, que a soma dos momentos em qualquer ponto tem de ser zero para que o sistema permaneça em equilíbrio estático. Segundo Clagett, essa descoberta foi sua contribuição mais original à estática, indo muito além da ciência medieval dos pesos de sua época.

FLUIDOS EM EQUILÍBRIO

Leonardo fez experimentos com balanças, alavancas e polias a fim de explorar as leis que governam os sistemas mecânicos em equilíbrio estático, mas estudou também o equilíbrio dos fluidos, hoje conhecido como hidrostática. Nos Códices Madrid, que contêm a maioria de suas primeiras investigações da “ciência dos pesos”, encontramos também comentários sobre a pressão dos líquidos e referências ao princípio de Arquimedes, bem como desenhos de escalas que medem os graus de flutuação de pesos submersos em água.

Desde a Antiguidade, a hidrostática era uma disciplina independente, sem relação com o estudo do fluxo de água (hoje conhecido como hidrodinâmica). Seus princípios gerais foram enunciados claramente por Arquimedes em seu texto clássico *Sobre os Corpos Flutuantes*. Esse tratado contém, em particular, o famoso princípio que hoje traz o nome de Arquimedes. Ele estabelece que a força de flutuação exercida sobre um objeto submerso é igual ao peso do fluido deslocado pelo objeto.

Grande parte do trabalho teórico de Arquimedes era tão avançada que seus contemporâneos e as gerações seguintes não a entenderam muito bem.[50] Traduções de vários fragmentos sobre hidrostática foram reproduzidas em inúmeros textos medievais, geralmente com pouca compreensão dos princípios implícitos. Esses textos devem ter dado a Leonardo apenas um conhecimento superficial da hidrostática de Arquimedes.

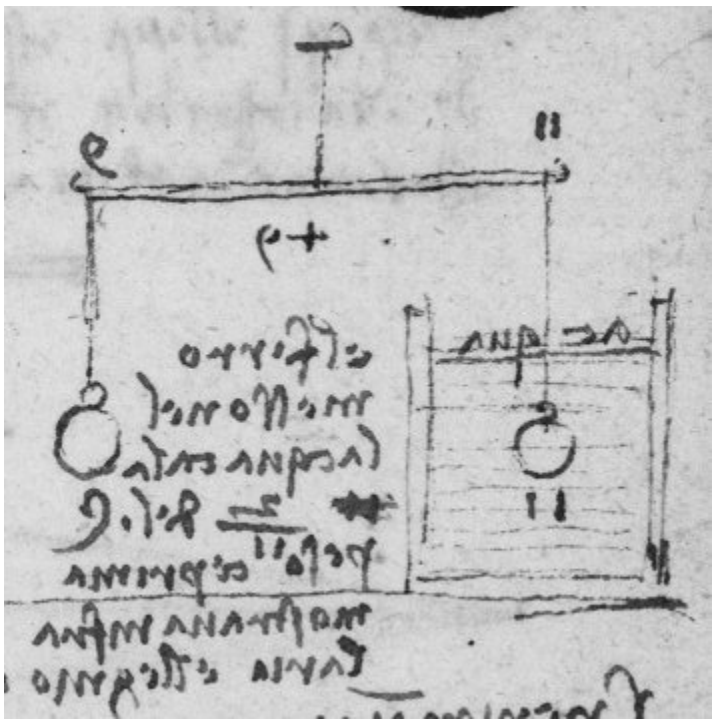


Figura 5-3: *Experimento para determinar a força de flutuação, Codex Madri I, fólio 181r.*

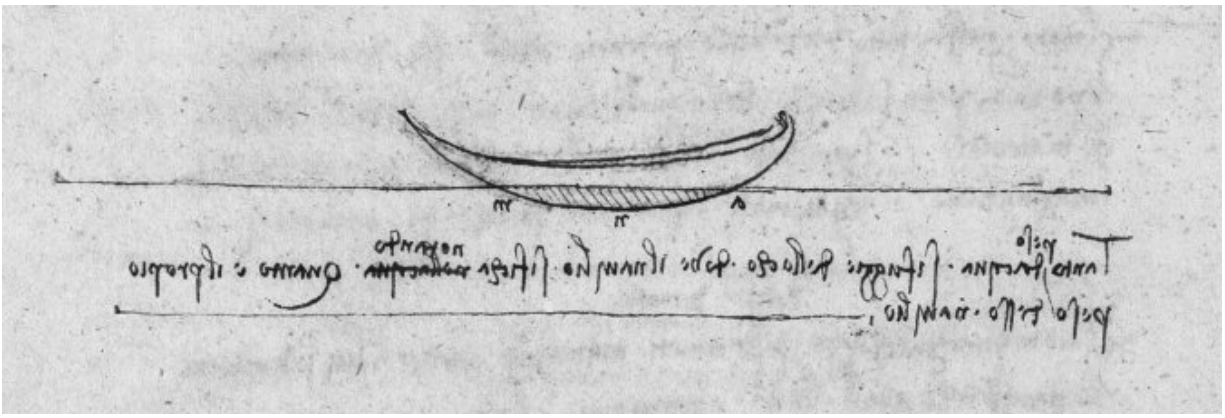


Figura 5-4: *Ilustração da quantidade de água deslocada por um bote, Codex Madri I, fólio 123v.*

Leonardo sem dúvida tinha um conhecimento geral da flutuação. Sabia que os objetos pesam menos na água que no ar e até tentou determinar a diferença experimentalmente. Dois desenhos similares nos Códices Madrid mostram pesos dependurados de uma balança, um no ar e outro submerso na água de uma vasilha.[51] No Codex Madri I (Fig. 5-3), o texto que acompanha a ilustração menciona diversos experimentos desse tipo e expõe os resultados quantitativos. Leonardo conhecia também o princípio básico dos corpos flutuantes. Um fólio antigo no mesmo Codex Madri I traz o esboço elegante de um bote flutuante (Fig. 5-4) acompanhado do seguinte comentário: “O peso do bote é o mesmo da água que ele desloca no local onde flutua”.[52] No entanto, pelo que sabemos de seus manuscritos existentes, Leonardo nunca expôs na totalidade o princípio de Arquimedes. Conhecia a fórmula dos objetos flutuantes, mas parece não ter percebido que uma fórmula parecida se aplica também aos objetos submersos. As numerosas anotações de Leonardo sobre hidrostática tornam claro que ele chegou apenas a um conhecimento parcial das leis da flutuação de Arquimedes.

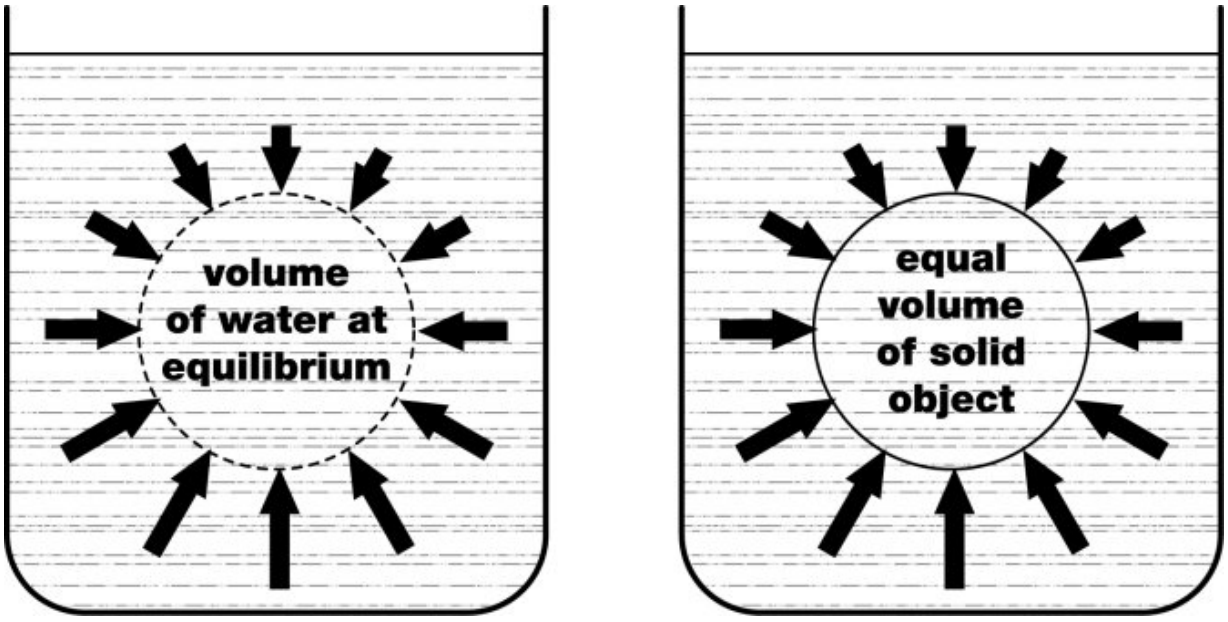


Figura 5-5: *Forças de flutuação numa "bola de água" em equilíbrio (a) e num objeto esférico sólido de volume igual (b); extraído de HyperPhysics.com, Georgia State University.*

É interessante examinar, em detalhe, o que impediu Leonardo de compreender plenamente o princípio de Arquimedes. Para compreender a origem da força de flutuação, é preciso saber que a pressão da água aumenta com a profundidade e que a pressão aumentada é exercida em todas as direções. Em consequência, há uma força líquida para cima a partir do fundo do objeto submerso, conforme ilustrado na Fig. 5-5.

Uma "bola de água", em qualquer parte da vasilha, estará em equilíbrio porque seu peso é suportado exatamente pela força de flutuação ou pressão líquida (ver Fig. 5-5ª). Se a bola de água for substituída por um objeto esférico sólido de igual volume, a distribuição da pressão no objeto será a mesma (ver Fig. 5-5b). Portanto, a força de flutuação no objeto sólido é igual ao peso da água deslocada, conforme estabelecido por Arquimedes.

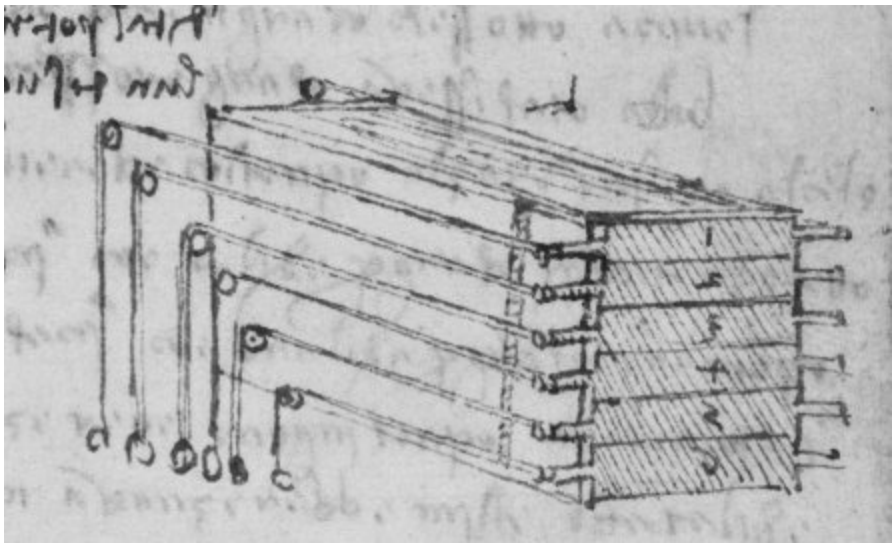


Figura 5-6: *Medição da variação da pressão da água conforme a profundidade, usando-se uma série de pratos móveis sustentados por forças contrárias que são geradas por pesos e transmitidas aos pratos por intermédio de cordas e polias, Codex Leicester, fólio 6r.*

Leonardo sabia, pelo menos em seus últimos anos, que a pressão da água num recipiente atua nas paredes verticais e aumenta da superfície para o fundo. No Codex Leicester, que redigiu quando estava por volta dos 50 anos, ele descreve um experimento muito engenhoso destinado a medir o aumento da pressão conforme a profundidade (ver Fig. 5-6). Como se lê na legenda, esse experimento é feito com um tanque de água “no qual uma das paredes é um pergaminho solto, sustentado por uma série de pratos, como no desenho, nos quais se colocam pesos opostos suficientes para mantê-los exatamente em contato com a frente do dito tanque”.[53] Caso Leonardo tenha feito mesmo esse experimento, ele lhe mostrou o aumento linear correto da pressão conforme a profundidade.

A despeito de seu conhecimento da variação da pressão da água, teria sido difícil para Leonardo concluir que o peso da “bola de água” na Fig. 5-5a é contrabalançado pela

pressão líquida para cima. A sofisticada compreensão de Arquimedes da distribuição da pressão da água se perdera com o passar dos séculos e só seria redescoberta 150 anos depois de Leonardo. Além disso, ele desconhecia o conceito do peso de uma porção de água imersa na água à sua volta, na vasilha. Durante boa parte da vida, Leonardo aceitou a visão aristotélica segundo a qual "nenhum elemento tem peso em sua própria esfera, só fora dela".[54] Essa teoria aristotélica da gravidade, comumente aceita na Idade Média e no Renascimento, tornava difícil, se não impossível, encarar o equilíbrio hidrostático de uma porção de água como o equilíbrio entre seu peso e a pressão líquida para cima da água à sua volta.

A visão aristotélica de um estado de imponderabilidade natural dos elementos também impediu Leonardo de elaborar uma concepção sofisticada da pressão da água, imprescindível para o pleno entendimento do princípio de Arquimedes. Ele tinha consciência da pressão gerada por um pistão, mas enfrentou grandes dificuldades para conceber uma distribuição de pressão da água em seu estado "natural".

A pressão nos fluidos é um conceito da moderna hidrostática, que a define como uma força (ou peso) por unidade de área. Como explica Enzo Macagno, físico e especialista em Leonardo, em seus detalhados estudos dos escritos leonardescos sobre hidrostática,[55] essa definição era difícil de aceitar na Idade Média e no Renascimento porque pressupõe a divisão de duas quantidades de dimensões diferentes – uma força por uma área. Tais divisões, ou multiplicações, só foram plenamente aceitas no

século XVII, quando a álgebra substituiu a geometria – e a álgebra é uma linguagem matemática bem mais poderosa, capaz de exprimir relações entre quantidades físicas em termos de equações abstratas.

Por causa dessas limitações matemáticas, Leonardo e seus contemporâneos só chegaram a compreender a pressão nos fluidos qualitativamente. O primeiro a dar uma explicação completa da distribuição da pressão num fluido em equilíbrio hidrostático foi o matemático e filósofo Blaise Pascal, no século XVII. Sua fórmula é conhecida hoje como princípio de Pascal e estabelece que a pressão aplicada a um líquido confinado, em qualquer ponto, é distribuída intacta pelo fluido em todas as direções, agindo em cada parte da superfície limítrofe da vasilha em ângulos retos.

Leonardo lutou com o problema da pressão por muitos anos, sem jamais entendê-lo perfeitamente. Como documentou o historiador da ciência Constantino Fasso, algumas páginas dos cadernos de notas antecipam conceitos essenciais que seriam formulados claramente nos sé culos seguintes, enquanto outras contêm declarações confusas e contraditórias.[56] Por exemplo, o Codex Madri I, em que Leonardo registrou suas primeiras investigações de hidrostática, já traz uma evidente, embora imprecisa, antecipação do princípio de Pascal. Perto do esboço de um peso colocado num odre de vinho, há a seguinte nota marginal: “Toda parte do odre sente igualmente a pressão do peso”.[57] Mas em outra seção do mesmo caderno de notas, ele fornece uma descrição errada de uma situação similar. Mostra uma vasilha cheia de água na qual a pressão é exercida por um peso através de uma bexiga de ar e

comenta que o aumento da pressão “empurra (...) cada parte do vaso do modo e na proporção antes exercidos só pela água”.[58] Em outras palavras, ele presume que o aumento da pressão não é constante no vaso (conforme reza o princípio de Pascal), mas varia com a profundidade na proporção da pressão hidrostática existente antes da aplicação do peso.

Nem os escritos da maturidade de Leonardo sobre hidrostática, no Codex Leicester, estão isentos dessas contradições. A descrição de seu brilhante experimento para medir a variação da pressão da água conforme a profundidade (Fig. 5-6) é um bom exemplo. Depois de afirmar com acerto que a pressão nas paredes verticais aumenta da superfície para o fundo do vaso, e descrever como medir o aumento, Leonardo acrescenta algumas linhas onde confunde de novo o problema. “A mesma regra”, diz ele, “pode ser usada no fundo do vaso para descobrir em que parte desse fundo a água pressiona mais”.[59] Sem dúvida, pelo menos na época em que escreveu essas linhas, Leonardo não sabia que a pressão da água se distribui igualmente em planos horizontais.

Num fólio do mesmo Codex Leicester, algumas páginas depois dos comentários contraditórios mencionados anteriormente, encontramos uma discussão mais madura da pressão hidrostática. De novo, ele considera um vaso cheio de água à qual a pressão é aplicada por uma abertura da tampa. “Á água, pressionada de cima”, escreve Leonardo:

> “adquire em seu contato com o vaso uma pressão uniforme (*potentia*). Concluo que a água, ao ser pressionada, adquire uma pressão uniforme

além da pressão desigual já existente nela, pois é óbvio que a água, por si mesma, exerce mais peso num orifício do fundo do vaso do que na superfície; para cada grau de profundidade, ela adquire um grau de peso".[60]

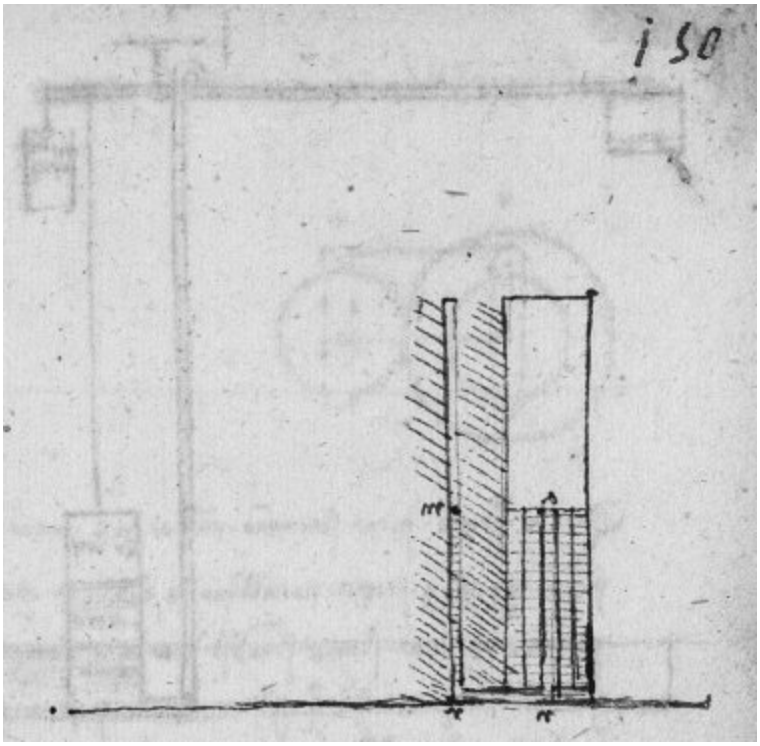
Comparando essa declaração com a do Codex Madri acima citada, que descreve o mesmo experimento e foi escrita cerca de dez anos antes, vemos que as ideias de Leonardo sobre pressão hidrostática amadureceram bastante nesse período. No Codex Leicester, ele declara de maneira inequívoca e correta que a pressão exercida na água por um peso se distribui igualmente no vaso e que a pressão total resultante se compõe de duas partes: a pressão hidrostática original, que não é uniforme e aumenta da superfície para o fundo, e a pressão constante acrescentada pelo peso. Além disso, declara de maneira também correta que a pressão hidrostática original aumenta linearmente de acordo com a profundidade.

Parece que a única falha na análise de Leonardo é a falta de uma definição explícita da pressão como força (ou peso) dividida por área, daí a ligeira confusão entre pressão e peso. A não ser por isso, o que ele disse no Codex Leicester antecipa em 150 anos o princípio de Pascal. E como a passagem é, pelo que sabemos, cronologicamente sua última discussão sobre a pressão hidrostática, podemos tomá-la pelo pronunciamento definitivo de Leonardo a respeito do assunto.

Outro fenômeno hidrostático que intrigava bastante Leonardo era o equilíbrio de líquidos nos vasos comunicantes, já bem conhecido em sua época. "As superfícies de todos os líquidos em repouso que se juntam

embaixo são sempre da mesma altura", anotou corretamente no Codex Atlanticus.[61]

Na "ciência dos pesos" medieval, questões de estática sempre foram tratadas aplicando-se as leis do equilíbrio da balança; portanto, era natural para Leonardo e outros engenheiros renascentistas recorrer à mesma abordagem na tentativa de explicar a lei dos vasos comunicantes. A analogia da balança de braços iguais em equilíbrio, com os pesos da água nos dois vasos, só é correta quando esses vasos são do mesmo tamanho. Quando um deles é maior, a balança hipotética só ficará em equilíbrio se a superfície da água estiver mais alta no vaso menor. Isso é contrário à evidência experimental, como Leonardo não deixou de notar.



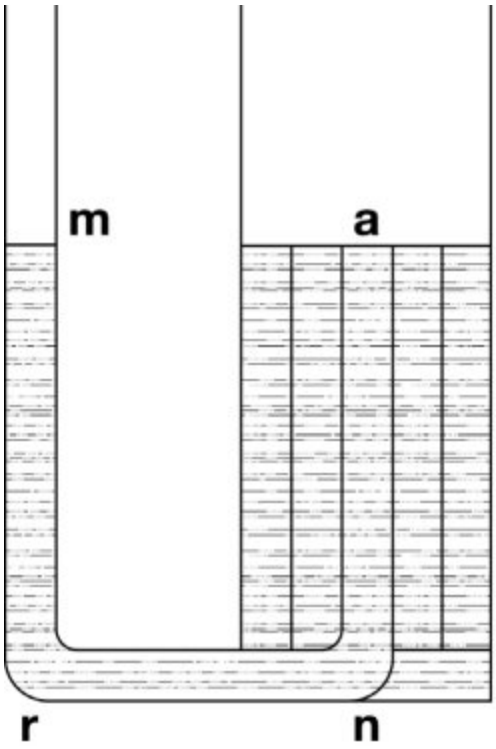


Figura 5-7: *Explicação pictórica de Leonardo para a lei dos vasos comunicantes, Codex Madri I, fólio 150r; reconstituição de Macagno, 1982.*

A solução desse paradoxo – como uma pequena quantidade de água, num lado, pode contrabalançar uma grande quantidade, no outro – exige a plena compreensão da pressão hidrostática alcançada por Pascal no século XVII. Segundo o princípio de Pascal, a pressão hidrostática tem de ser a mesma em todos os planos horizontais para que a água fique em equilíbrio. Isso significa que a altura, sob as superfícies, precisa ser igual, embora suas áreas sejam irrelevantes porque a pressão iguala o peso por unidade de área.

Sem essa sofisticada concepção da pressão, Leonardo nunca conseguiu resolver completamente o paradoxo dos vasos comunicantes. No entanto, encontrou uma explicação engenhosa durante suas primeiras reflexões sobre hidrostática. No Codex Madri I, há o desenho de vasos

comunicantes de tamanho desigual com níveis de água da mesma altura indicados corretamente (ver Fig. 5-7). Nesse esboço, Leonardo dividiu a água do vaso maior em várias colunas. Na legenda, esclarece que nem toda água do vaso maior contrabalança o peso da água do vaso menor, apenas uma coluna (a-n) com a mesma secção transversal da do vaso menor (m-r). Em vista de sua limitada compreensão da pressão da água, na época, esse raciocínio é notável. “A abordagem do problema dos vasos comunicantes, por Leonardo”, comenta Constantino Fasso, “parece-me o ponto alto que poderia ser alcançado num tempo em que o conceito de pressão ainda não fora entrevisto”.[62]

FORÇAS E MOVIMENTO – UM LABIRINTO CONCEITUAL

Durante seus estudos da “ciência dos pesos” e da hidrostática, Leonardo se interessou pelas relações gerais entre forças e movimento. Na tentativa de delinear o que em séculos posteriores receberia o nome de “ciência do movimento”, ele se deparou com dificuldades conceituais bem maiores que em seus trabalhos sobre estática. O raciocínio matemático que empregou na análise de máquinas era mais difícil de aplicar aos fenômenos dinâmicos de corpos em movimento sob a influência de forças e em colisão uns com os outros. Além disso, os conceitos exigidos para descrever tais fenômenos em termos matemáticos – conceitos como energia, impulso, força, aceleração etc. – ainda não haviam sido plenamente desenvolvidos. De fato, seriam necessários mais dois

séculos para que se identificassem e se definissem claramente os conceitos básicos da mecânica. Como assinala o historiador da ciência Domenico Bertoloni-Meli, mesmo as primeiras especulações de Galileu sobre o movimento, cem anos depois das de Leonardo, enredaram-se "num labirinto conceitual e terminológico na intersecção entre o aristotelismo e a nova ciência".[63]

Segundo a teoria aristotélica dos quatro elementos, comumente aceita na Idade Média e na Renascença, os movimentos deles decorrem de uma tendência natural a retornarem, quando perturbados, a seus devidos lugares dentro de esferas concêntricas ao redor da Terra.[64] Leonardo acatou essa explicação teleológica das forças e do movimento durante boa parte da vida, mas em várias ocasiões questionou suas premissas básicas, percebendo que eram obstáculos a quaisquer tentativas de entender os fenômenos mecânicos. Por exemplo, num pequeno caderno escrito quando empreendia os primeiros estudos de mecânica, hoje conhecido como Manuscrito I, ele consignou uma série de perguntas sobre o movimento que tencionava explorar e que claramente revelam suas dúvidas sobre o esquema aristotélico:

> Qual é a causa do movimento? O que é o movimento em si? O que está melhor adaptado ao movimento? O que é impulso? Qual é a causa do impulso e do meio onde ele é criado? O que é percussão? Qual é a sua causa? O que é ricochete? Qual é a curvatura do movimento retilíneo e o que a provoca?[65]

Alguns anos depois, ele exprimiu dúvidas similares quanto ao conceito aristotélico da gravidade em conexão com o fluxo de água.[66] Nessa luta com o labirinto conceitual

da mecânica clássica e medieval, Leonardo às vezes revelou uma apreensão intuitiva de ideias e relações abstratas muito além de seu tempo; outras, porém, não logrou se desvencilhar da coação das tradicionais posturas aristotélicas.

Ao rever as conquistas de Leonardo em cinemática e dinâmica, nas páginas seguintes, procurarei aqui e ali compará-las às de Galileu, o outro grande cientista da Toscana, nascido mais de um século depois dele. Galileu publicou suas especulações iniciais a respeito do movimento, *De Motu Antiquiora* ("Antigos Trabalhos sobre o Movimento"), em 1592, cerca de cem anos após as primeiras investigações de Leonardo no campo da mecânica; e a obra madura de Galileu, os *Discorsi* ("Discursos"), veio a público em 1638, uns 125 anos depois dos escritos da maturidade de Leonardo. A comparação entre a mecânica de Leonardo e a de Galileu é sedutora porque eles fizeram experimentos semelhantes, enfrentaram os mesmos problemas conceituais e empregaram uma linguagem matemática parecida, formalizando as regularidades que descobriram em termos de proporções e leis geométricas, não de equações algébricas. Em termos conceituais, a obra madura de Galileu está por assim dizer a meio caminho entre suas primeiras especulações, bem como as de Leonardo, e a publicação dos *Principia* ("Princípios") de Isaac Newton, em 1687. A grande obra de Newton, na qual ele usou notação algébrica e seu cálculo recém-inventado, representou o fecho triunfal da nova "ciência do movimento".

AS QUATRO "POTÊNCIAS" DA NATUREZA

Em suas tentativas de lançar alguma luz sobre a mecânica clássica e medieval, Leonardo identificou quatro variáveis básicas – movimento (ou velocidade), peso, força e percussão (ou "impacto", como diríamos hoje). Não usou o termo moderno "variável", mas "potência" (*potentia*), que aparece frequentemente, com uma ampla gama de significados, nos cadernos de notas. Em seus escritos sobre hidrostática, por exemplo, *potentia* quer dizer "pressão"; em outros textos, corresponde ao termo moderno "energia"; e Leonardo também descreve a força exercida por organismos vivos como uma "potência invisível".

O fato de *potentia*, em Leonardo, ser um termo vago em comparação com a moderna terminologia científica não é nada surpreendente para o século XV. Hoje, sabemos que suas quatro "potências" da natureza têm diferentes dimensões; por isso, acredito que *potentia* nesse contexto deve ter mais ou menos o sentido do vocábulo atual "variável". Essa interpretação é reforçada pela insistência de Leonardo em que a principal característica das quatro "potências" consiste em sua variabilidade contínua (como as variáveis nas modernas funções matemáticas). Entre as primeiras notas de Leonardo sobre mecânica (Codex Madri I), encontramos esta declaração enfática:

> Diríamos a verdade caso afirmássemos ser possível conceber todas as potências como capazes de aumentar e diminuir infinitamente (...) Elas podem crescer do nada para uma grandeza infinita, em graus iguais. E, nos mesmos graus, decrescer ao infinito por diminuição, terminando no nada.[67]

Depois de definir as variáveis básicas da mecânica, Leonardo tenta estabelecer relações quantitativas entre

elas. Durante a maior parte da vida, ele acreditou que todas essas relações podiam ser representadas como proporções diretas ou inversas – aproximadamente aquilo que hoje chamamos de funções lineares. Dava a essas relações algébricas proporcionais ou lineares o nome de "piramidais", utilizando pirâmides ou triângulos isósceles (isto é, triângulos com dois lados iguais) a fim de representá-las geometricamente.[68]

Num fólio do Codex Atlanticus, Leonardo ilustra as ações das potências naturais mediante vários exemplos, iniciando a página com as seguintes palavras em destaque: "Todas as potências da natureza (...) devem ser chamadas piramidais porque têm graus em contínua proporção com sua diminuição ou aumento."[69] Ou seja, todas as potências variam constantemente e suas variações podem ser expressas em termos de relações lineares.

A crença de Leonardo em que as relações "piramidais" (lineares) fossem universais na natureza derivava de sua familiaridade com as proporções lineares da perspectiva. Como muitos matemáticos da época, ele frequentemente usava figuras geométricas para representar relações algébricas, vendo a pirâmide ou triângulo isósceles como um vigoroso símbolo de um liame conceitual entre a óptica e a mecânica.

Essa crença no caráter universal das relações lineares impediu Leonardo, às vezes, de reconhecer outros tipos de relações algébricas que não são muito fáceis de expressar em termos de figuras geométricas. Por exemplo, ele não conseguiu perceber que as distâncias percorridas por corpos em queda aumentam com os quadrados dos tempos e não

linearmente. Vale notar que Galileu cometeu o mesmo erro em seus primeiros trabalhos – e pelas mesmas razões. Numa carta escrita em 1604, ele estabeleceu como "princípio indubitável" que as velocidades dos corpos em queda aumentam na razão das distâncias percorridas, isto é, que tanto as velocidades quanto as distâncias aumentam linearmente com o tempo. Segundo o historiador da ciência Bertoloni-Meli, "Galileu pode ter sido induzido a presumir (incorretamente) a proporcionalidade entre velocidades e distâncias devido ao papel intuitivamente privilegiado (...) da proporcionalidade direta com respeito a relações mais complexas".[70]

Galileu por fim corrigiu seu erro e Leonardo, posteriormente, também descobriu relações funcionais mais complexas entre as variáveis físicas. Mas então estava muito ocupado com outros projetos para rever suas afirmações sobre a universalidade das relações piramidais entre as quatro potências da natureza.[71]

Os escritos de Leonardo sobre movimento, peso, força e percussão estão amplamente dispersos pelos cadernos de notas, do início de suas notas científicas no Codex Trivulzianus e nos antigos códices Forster e Manuscrito A aos registros no Manuscrito E, compilado na velhice, bem como nas amplas coleções de notas dos códices Arundel e Atlanticus.[72] Nas páginas seguintes, terei de me limitar a uns poucos esclarecimentos sobre as observações, descobertas e especulações de Leonardo no campo da mecânica.

A NATUREZA DO MOVIMENTO

Quando Leonardo ampliou seus estudos de mecânica para além da estática, percebeu que a natureza do movimento e suas relações com diversas forças seriam agora o objeto principal de suas pesquisas. Assim, não é de estranhar que considerasse o movimento como a mais fundamental entre as quatro potências da natureza. “Falemos primeiro do movimento”, escreveu ele num lembrete para si mesmo, “e depois do peso, pois este decorre daquele; em seguida, da força, que provém de ambos; e por fim da percussão, que se origina do peso, do movimento e muitas vezes da força”.[73]

Os vínculos causais entre as quatro potências, estabelecidos nessa declaração, parecem um tanto arbitrários; e, de fato, Leonardo logo reconheceu que movimento, peso, força e percussão estavam tão estreitamente ligados que seria impossível assinalar um deles como primário:

> Gravidade, força e percussão são de natureza tal que cada uma pode por si mesma brotar de qualquer das outras (...) e todas, juntas ou individualmente, podem criar movimento e dele surgir.[74]

Não obstante, parecia a Leonardo que o movimento era o melhor ponto de partida para analisar as relações entre as quatro potências da natureza. No Codex Arundel, ele reafirma que o movimento, como as três outras potências, varia continuamente; e, na mesma passagem, identifica corretamente a relação básica entre velocidade, distância e tempo:

> O movimento é mais lento quando cobre menos distância ao mesmo tempo. E mais rápido quando cobre mais distância ao mesmo tempo (...). O movimento pode estender ao infinito a lentidão e a velocidade.[75]

Mais notável ainda é o fato de Leonardo ter percebido a relatividade do movimento. “O movimento do ar contra um objeto fixo é o mesmo de um objeto móvel contra o ar imóvel”, anotou ele no Codex Atlanticus. “E isso é verdadeiro também para a água, que em circunstância similar me revelou exatamente a mesma natureza”.[76] Com efeito, em página anterior do citado códice, Leonardo observou acuradamente: “A ação de uma haste que movimentamos em água parada lembra a de água corrente contra uma haste imóvel”.[77]

Leonardo sem dúvida reconheceu a importância de sua descoberta, pois registrou-a várias vezes em diversos manuscritos. Todas essas declarações são expressões claras e belas de um princípio capital da mecânica moderna. A relatividade do movimento foi redescoberta e formulada matematicamente no final do século XVII pelo famoso físico e matemático Christiaan Huygens, em conexão com as leis da colisão. Constitui a base do túnel de vento, a grande ferramenta experimental da aerodinâmica moderna.

Como fazemos em cinemática atualmente, Leonardo distinguia entre movimento “retilíneo” (linear) e curvo, considerando os movimentos circular, espiralado e “irregular” como tipos especiais do movimento curvo.[78] Considerando-se seu enorme fascínio pelas espirais,[79] não surpreende que ele identificasse quatro movimentos espiralados distintos, correspondentes às espirais convexa, plana, côncava e “colunar” (helicoidal).

Em seu incansável trabalho com máquinas, Leonardo teve ampla oportunidade de estudar rodas girando em diversos eixos. Distinguiu corretamente entre velocidade

angular e velocidade linear, como diríamos hoje. “A parte de uma roda giratória com menos movimento é aquela que fica mais perto do centro do giro”, anotou ele no Manuscrito E.[80] Como já dissemos, Leonardo contrapôs o movimento circular das rodas ao movimento espiralado dos vórtices de água em seus estudos pioneiros dos fluxos turbulentos de água e ar.[81] “O movimento espiralado ou turbilhonante de qualquer líquido é tanto mais rápido quanto mais se aproxima do centro de sua revolução”, observou com a máxima exatidão, “[ao passo que] o movimento circular de uma roda é tanto mais lento quanto mais se aproxima do centro do objeto giratório”.[82]

Leonardo tinha plena consciência de que, com a distinção entre velocidade angular e velocidade linear, descobrira uma propriedade característica não apenas de rodas giratórias, mas de todos os movimentos circulares. Vemos diversas ilustrações dessa concepção em seus manuscritos, inclusive a que se segue, a respeito de armas de caça, em notas antigas sobre mecânica no Manuscrito I:

> O venábulo ou lança de picador tem movimento maior que o braço (...) porque, ao mover o braço, a mão descreve um círculo bem mais amplo que o cotovelo; em consequência, movendo-se ao mesmo tempo, a mão cobre duas vezes o trajeto coberto pelo cotovelo; pode-se, pois, dizer que sua velocidade é o dobro da velocidade do movimento do cotovelo.[83]

Leonardo não deixou de reconhecer a força centrífuga gerada pelo movimento circular e observou, também corretamente, que quando um objeto giratório se solta da corda que lhe imprime o giro, ele escapa numa trajetória tangencial:

> O peso que se move em torno do ponto fixo de uma corda à qual está ligado puxa e estica a corda com grande força; e se a corda for separada de seu ponto fixo, o peso carregará consigo a dita corda ao longo da linha para a qual foi atraído quando de sua separação do ponto fixo.[84]

Passaram-se mais 150 anos até que essas características do movimento circular fossem redescobertas por Robert Hook e Christiaan Huygens.

FORÇA E MOVIMENTO

Em sua análise das relações entre força e movimento, Leonardo permaneceu largamente nos confins do quadro aristotélico. Distinguiu o movimento "natural" – a volta espontânea de um elemento a seu estado primitivo – do movimento "violento" ou "acidental", em que um elemento é deslocado de seu estado primitivo por uma força qualquer. "A gravidade e a leveza são forças acidentais", explicou Leonardo no Codex Atlanticus, "produzidas quando um elemento é puxado por ou para outro. Nenhum elemento, em si mesmo, tem gravidade ou leveza".[85]

Nesse contexto aristotélico, "gravidade" não se refere a uma força, como na física newtoniana, mas antes à "ponderabilidade" criada quando se desloca um objeto sólido para cima, para longe da Terra e, portanto, de seu lugar primitivo. De igual modo, julgava-se que a "leveza" era criada quando o ar se deslocava para baixo e mergulhava na água. Em ambos os casos, tratava-se de movimentos "violentos", para os quais se exigiam forças, enquanto a volta do elemento ao estado primitivo se devia a uma tendência inerente, não a uma força externa.

A distinção aristotélica entre movimento natural e movimento violento, bem como sua afirmativa de que eles são fundamentalmente diferentes, não podendo por isso misturar-se, foram aceitas pelos filósofos naturais ao longo da Idade Média e da Renascença. Essa distinção, abandonada no início do século XVII por Galileu, ainda assim continuou sendo debatida por seus contemporâneos.

A situação foi se esclarecendo aos poucos depois da criação do conceito de inércia. De fato, segundo o historiador da ciência Robert Lenoble, “A mecânica moderna nasceu com o princípio de inércia”.[86] O passo final e decisivo foi dado por Isaac Newton, que reconheceu claramente a inércia como a tendência de um corpo maciço a preservar seu estado de repouso, ou movimento retilíneo uniforme, a menos que uma força atue sobre ele. A consequência dessa ideia fundamental, hoje conhecida como primeira lei do movimento de Newton, foi que a força daí por diante não mais ficou associada ao movimento em geral, mas apenas aos deslocamentos de um corpo – ou seja, à aceleração.

Como todos os estudiosos medievais e renascentistas, Leonardo aceitava a afirmativa de Aristóteles segundo a qual um objeto em movimento violento continuaria a se deslocar apenas enquanto a força atuasse sobre ele. “Nenhum objeto inanimado pode puxar ou empurrar alguma coisa sem ir junto com ela”, escreveu Leonardo no seu antigo Manuscrito A. “E aquilo que a empurra só pode ser uma força ou um peso”.[87] Um problema óbvio com essa postura aristotélica era a dificuldade de explicar por que uma pedra arremessada, por exemplo, continua a se mover depois de perder contato com a mão que a arremessou ou

uma flecha depois de se desprender do arco que a impeliu. Os filósofos medievais estavam plenamente conscientes dessa dificuldade e encontraram para ela uma solução engenhosa. Postularam que a força motriz aplicava ou "infundia" no objeto atirado um impulso que o mantinha em movimento até que esse impulso se dissipasse, como o calor permanece no ferro depois que este é removido do fogo.

A teoria medieval do impulso foi expressa em sua forma mais requintada, no século XIV, pelo filósofo escolástico francês Jean Buridan. Leonardo estudou as ideias de Buridan, inclusive sua imaginativa teoria de movimentos tectônicos em ciclos geológicos, nos escritos de Alberto da Saxônia;[88] e, à medida que avançava nas pesquisas de mecânica, passou a usar o conceito de impulso com frequência crescente. No primeiro caderno de notas, o Codex Trivulzianus, descreveu o fenômeno do impulso, mas sem empregar esse termo:

> Todo corpo movido ou percutido retém em si, por algum tempo, a natureza dessa percussão ou movimento; e tanto mais ou tanto menos a reterá quanto maior ou menor for a força do impacto ou do movimento.[89]

Mais ou menos na mesma época, analisou cuidadosamente (de novo sem usar o termo "impulso") de que modo a perturbação produzida por uma pedra atirada num lago calmo se espalha a partir do ponto de contato em ondas circulares:

> A água, embora permanecendo em sua posição, capta com facilidade esse tremor das partes vizinhas e transfere-o para outras partes adjacentes, com força que vai diminuindo até desaparecer.[90]

Em anos posteriores, definições de “impulso” segundo a concepção de Buridan reaparecem frequentemente nos cadernos de notas de Leonardo. No Manuscrito G, por exemplo, ele anota:

> O ímpeto é a impressão de movimento transmitida pelo motor ao objeto movido. É uma força impressa no objeto movido pelo motor.[91]

Leonardo aplicou o conceito de impulso a vários fenômenos mecânicos que hoje associamos à inércia, como a estabilidade do pião, os diversos movimentos oscilatórios e as colisões.[92] No entanto, se Buridan descrevia o impulso, quantitativamente, como proporcional tanto à quantidade de matéria quanto à velocidade do objeto, nenhum tratamento quantitativo é evidente nos cadernos de notas de Leonardo que chegaram até nós.

Em seus primeiros trabalhos sobre mecânica, ele manteve a concepção medieval do impulso como uma força infundida no objeto em movimento e depois dissipada por si mesma. Todavia, à medida que foi se interessando cada vez mais pelo atrito, Leonardo começou a se dar conta dos efeitos da viscosidade tanto na água quanto no ar[93] e percebeu que a resistência do ar é que diminuía aos poucos o impulso de um projétil:

> A força do motor (...) se imprime no corpo que se move e, depois de algum tempo, é consumida quando este atravessa o ar, o qual está sempre comprimido diante dele.[94]

Além disso, Leonardo reconheceu que, no disparo de projéteis, havia uma interação contínua entre movimento natural e movimento violento. “O movimento natural, associado ao movimento do motor, consome o impulso

deste último", observou já ao fim da vida no Manuscrito E.[95] Graças a essa descrição da interação entre a inércia do projétil e a força da gravidade (como diríamos hoje), Leonardo claramente transcendeu o quadro aristotélico, em que os movimentos natural e violento jamais poderiam se integrar.

Nos séculos seguintes, o conceito medieval de impulso evoluiu aos poucos para a definição moderna do fenômeno, postulado quer como produto da massa pela velocidade de um objeto, quer como vetor, isto é, uma quantidade dotada ao mesmo tempo de magnitude e direção. No fim do século XVI, Galileu ainda via no impulso uma entidade que se dissipava sozinha.[96] Descartes pôs de lado essa imagem ao introduzir a expressão "quantidade de movimento" para substituir "impulso", mas considerava-a independente da direção. No século XVII, finalmente, Huygens foi o primeiro a falar em conservação da quantidade de movimento, dando ao fenômeno seu significado moderno.

CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

Entre os conceitos básicos da mecânica, o de energia foi o que mais tardou a ser identificado e formulado com precisão. É bem mais abstrato que os de massa, força e *momentum*, mas tornou-se um dos mais importantes da física moderna. Sua relevância é devida ao fato de a energia total em qualquer processo físico sempre se conservar. A energia pode assumir diversas formas – gravitacional, cinética, térmica, química etc. –, mas sua quantidade total num dado processo, ou conjunto de processos, nunca se

altera. Não se conhece nenhuma exceção à lei da conservação da energia. Ela é uma das leis mais fundamentais e de maior alcance da física.

O célebre filósofo e matemático alemão Gottfried Wilhelm Leibniz, contemporâneo de Isaac Newton, é em geral tido como o primeiro a reconhecer a conservação da energia. Chamou-a de “força viva” (*vis viva*) e definiu-a como o produto da massa de um objeto por sua velocidade ao quadrado.[97] Newton aceitou a conservação da energia, mas, ao que se diz, não gostava de princípios de conservação e não lhes deu grande importância. Fato interessante, tanto para Newton quanto para Leibniz a discussão da conservação como lei fundamental da natureza envolvia preocupações filosóficas e teológicas.[98]

O termo “energia”, no sentido moderno, foi empregado pela primeira vez no início do século XIX, com cientistas e filósofos debatendo anos a fio se ela era algum tipo de substância ou simplesmente uma quantidade física. Só depois da formulação da termodinâmica, em meados do século XIX, é que a energia foi definida como a capacidade de realizar trabalho. A seguir, a conservação da quantidade total de energia ao longo de múltiplas transformações geradas por processos mecânicos e termodinâmicos pôde ser claramente estabelecida.

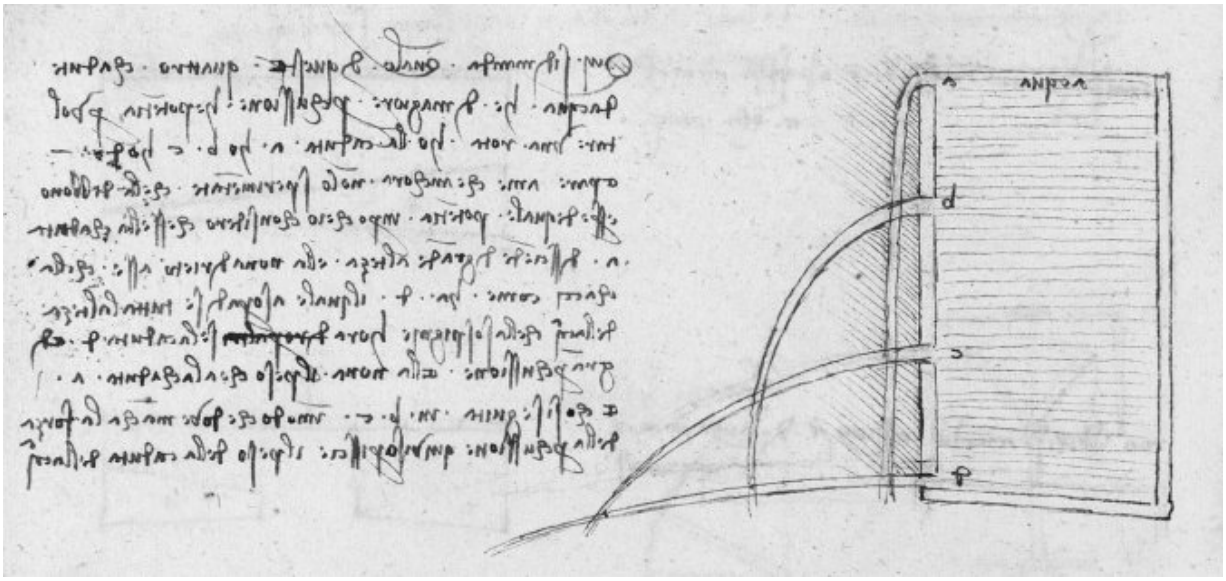


Figura 5-8: *Jatos de água jorrando de uma vasilha em quatro alturas diferentes, Codex Madri I, fólio 134v.*

Considerando-se a lenta emergência do conceito de energia, que exigiu mais de três séculos, e a relutância do próprio Isaac Newton em atribuir importância à sua conservação, é realmente notável que Leonardo da Vinci tenha tido um vislumbre desse fenômeno ainda no século XV. Em sua ciência das formas vivas, que sofreu inúmeras mudanças e reformulações, Leonardo deu especial atenção à conservação de certas quantidades – massa e volume, em particular –, desenvolvendo a original "geometria feita com movimento" para exprimir esses princípios matematicamente.[99] Estendeu o conceito de conservação até ao movimento de objetos sólidos no espaço. "Com respeito aos objetos que se movem", escreveu ele, "o espaço que adquirem é do tamanho daquele que deixam para trás".[100]

Leonardo via na conservação do volume um princípio geral que rege todas as mudanças de formas naturais, quer se trate de corpos sólidos movendo-se no espaço ou de

corpos flexíveis alterando seu aspecto. Aplicou esse princípio ao fluxo de água e outros líquidos,[101] bem como a vários movimentos do corpo humano, especialmente a contração dos músculos.[102]

Levando-se em conta a maneira única com que Leonardo encarava os princípios de conservação, talvez seja compreensível, mas nem por isso menos notável, que ele tenha reconhecido intuitivamente a conservação da energia em seus estudos de mecânica. Exemplo impressionante dessa intuição é o apresentado no Codex Madri I, onde ele descreve e desenha seu experimento com um recipiente do qual a água jorra em várias alturas (Fig. 5-8).

Leonardo inicia a discussão desse experimento estabelecendo claramente o problema. “Aqui, a pergunta é:”, escreve ele, “qual dessas quatro quedas tem mais percussão e poder para girar uma roda: a queda *a* ou *b, c* ou *d*?”. Na análise subsequente, observa que a velocidade inicial do jato cresce à medida que o recipiente vai sendo esvaziado, por causa do aumento da pressão da água. No entanto, faz a seguinte conjectura:

> Ainda não realizei esse experimento, mas me parece que [os quatro jatos] devem ter o mesmo poder (...) [pois] a falta da força de percussão é compensada pelo peso da queda da água.[103]

Na terminologia moderna, diríamos que Leonardo raciocinou da seguinte maneira. À medida que a energia cinética (ou “força de percussão”) gerada pela queda livre das partículas de água diminui com a altura dos jatos, essa diminuição é compensada pela crescente energia potencial (ou “peso da queda d’água”), o que resulta no aumento da pressão da água e da velocidade inicial do jato. Em virtude

dessa compensação, a energia total (ou “poder”) dos jatos em seu impacto com o chão permanece constante, independentemente da altura dos jatos.

Vale notar que o desenho de Leonardo das quatro “quedas d’água” não é acurado. Se ele houvesse feito mesmo o experimento, notaria que as distâncias horizontais percorridas pelos jatos foram pintadas incorretamente. Embora a velocidade dos jatos diminua na razão inversa de sua altura, o tempo que levam para atingir o chão se torna menor, o que afeta as distâncias horizontais percorridas.

Hoje, podemos calcular facilmente o tempo que as partículas de água de cada jato, em queda livre, levam para atingir o chão a partir da altura do jato, bem como a distância horizontal que percorre durante esse tempo com sua velocidade inicial.[104] Esse cálculo mostra que a distância horizontal aumenta enquanto o nível de escoamento diminui, chega ao ponto máximo no jato situado na metade da altura do recipiente e diminui simetricamente nos jatos situados na metade inferior. A curva que obtemos contrapondo as distâncias horizontais alcançadas pelos jatos às suas alturas é uma elipse (ver Fig. 5-9).

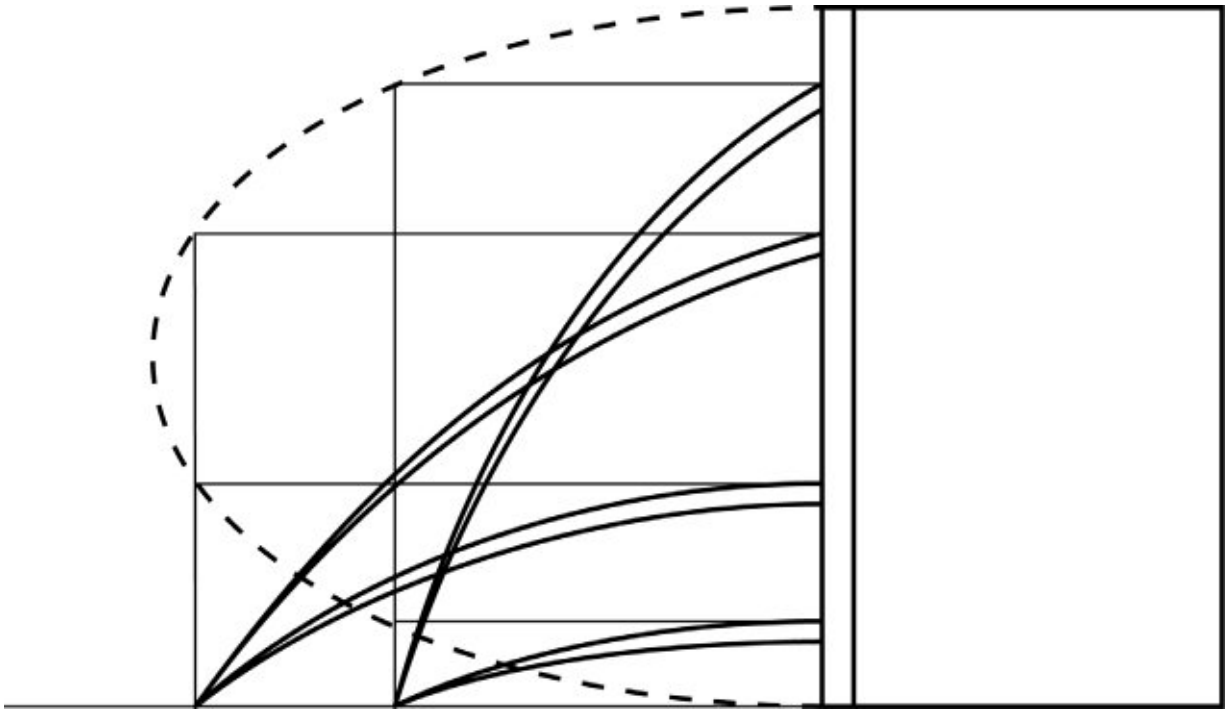


Figura 5-9: *Relações corretas entre as distâncias horizontais alcançadas pelos jatos e as alturas dos jatos; adaptado de Fasso (1987).*

À falta de nossa terminologia e nossas formulações quantitativas modernas, tais cálculos estavam além do alcance de Leonardo. Mas essas limitações tornam ainda mais impressionante o fato de ele ter intuído, equacionando-o corretamente, o princípio da conservação da energia para a água corrente. A importante lei da conservação foi redescoberta e formulada com precisão apenas em meados do século XVIII, pelo matemático Daniel Bernoulli, sendo hoje conhecida como teorema de Bernoulli.

MOVIMENTOS DE CONSUMO

Quando os físicos do século XIX desenvolveram a ciência da termodinâmica, formularam dois princípios fundamentais, conhecidos hoje como a primeira e a segunda lei da

termodinâmica. A primeira é a da conservação da energia. A segunda estabelece que, embora a energia total envolvida num processo sempre se conserve, a quantidade de energia útil diminui, dissipando-se sob a forma de calor, atrito etc. É realmente notável que Leonardo da Vinci tenha antecipado essas duas leis fundamentais da física e que sua arguta compreensão da dissipação da energia o tenha conduzido a concepções profundas de mudança, transformação e natureza do tempo, adiantando-se a ideias similares da física moderna em mais de três séculos.

A perda de energia mecânica em consequência do atrito já era bem conhecida dos engenheiros renascentistas. Na época, os guindastes, gruas e outras máquinas de grande porte eram feitos de madeira e o atrito entre suas partes móveis criava sérios problemas. Leonardo inventou vários dispositivos sofisticados para reduzir o atrito e o desgaste, inclusive sistemas automáticos de lubrificação, mancais de pedras semipreciosas e roletes móveis de formas variadas – esferas, cilindros, cones truncados etc.[105] A Fig. 5-10 mostra um belo exemplo de mancal rotatório composto de oito hastes de lados côncavos girando em seus próprios eixos, intercalado por bolas que podem girar livremente mas são impedidas de movimentos laterais pelas hastes. Quando uma plataforma é colocada nesse mancal de bola, o atrito é reduzido de modo que a plataforma pode ser girada facilmente mesmo com uma carga pesada.

Todos os grandes engenheiros da Renascença estavam cientes dos efeitos do atrito, mas Leonardo foi o único que empreendeu estudos empíricos sistemáticos de sua natureza e propriedades. Ele investigou as forças de atrito

entre vários sólidos, bem como as da água e do ar, e desenhou para esses estudos equipamentos experimentais que estavam bem à frente de seu tempo.[106]

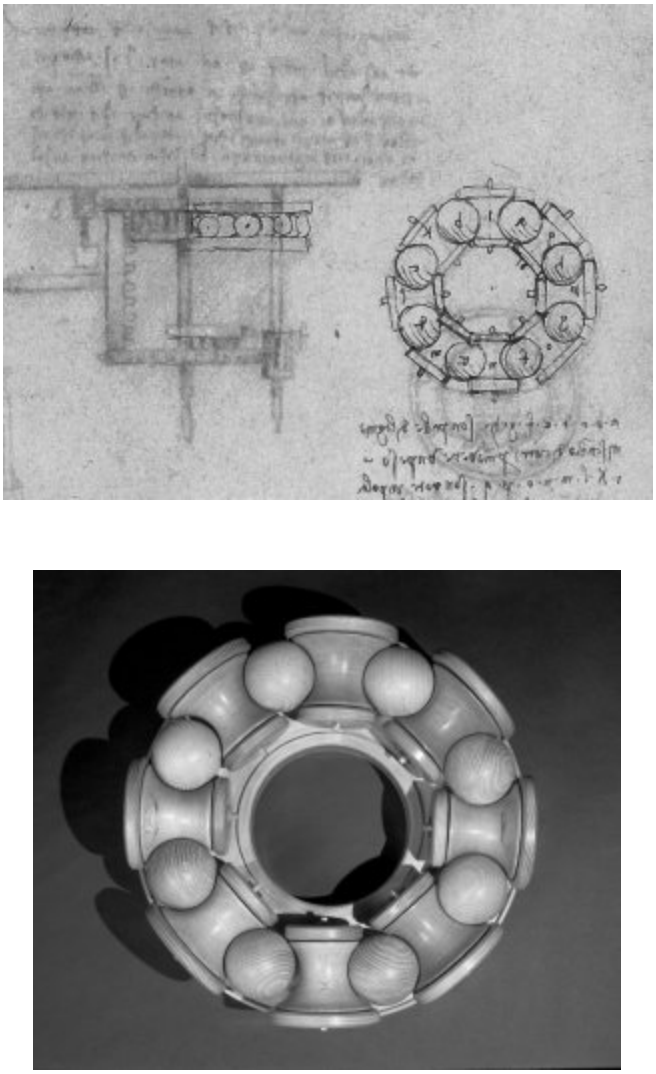


Figura 5-10: *Mancal de bola rotatória, Codex Madri I, fólio 20v; modelo por Muséo Techni, Montreal, 1987.*

Leonardo descobriu por experiência que, quando um objeto desliza contra uma superfície, o coeficiente de atrito é determinado por três fatores: a aspereza das superfícies, o peso do objeto e o ângulo de um plano inclinado:

Para saber com precisão a quantidade de peso requerida para mover cem libras em uma rua em declive, é preciso conhecer a natureza do contato que esse peso terá na superfície de atrito em seu movimento, porque diferentes corpos têm diferentes atritos (...).

Diferentes declives compõem diferentes graus de resistência ao contato; porque, se o peso que precisa ser movido está ao nível do chão e tem de ser arrastado, sem dúvida estará na primeira força de resistência, porque tudo repousa sobre a terra e nada na corda que precisa movê-la (...). Mas você sabe que, se alguém puxá-la direto para cima, raspando e tocando levemente uma parede perpendicular, o peso estará quase todo na corda que o puxa, e muito pouco na parede na qual ela resvala.[107]

As conclusões de Leonardo são totalmente corroboradas pela mecânica moderna. Hoje, a força de atrito é definida como o produto do coeficiente de atrito (medindo a aspereza das superfícies) e a força perpendicular à superfície de contato (que depende tanto do peso do objeto como da inclinação da superfície). Leonardo não apenas analisou as forças de atrito corretamente como obteve resultados quantitativos mais ou menos precisos dois séculos antes de o moderno estudo do atrito começar e três antes de o assunto ser totalmente liquidado pelo físico Charles Coulomb.

Leonardo estendeu seu entusiástico interesse pelo atrito a seus vastos estudos da mecânica dos fluidos. O Codex Madri contém registros meticulosos de suas investigações e análises da resistência da água e do ar a corpos sólidos em movimento, bem como da resistência da água e do fogo movendo-se no ar.[108] Ciente do atrito interno dos fluidos, conhecido como viscosidade, ele dedicou diversas páginas dos cadernos de notas ao registro dos seus efeitos no fluxo de fluidos.[109] “A água tem sempre uma

coesão em si mesma", escreveu no Codex Leicester, "e ela será mais potente quanto mais viscosa se tornar".[110]

A resistência do ar era de especial interesse para Leonardo, porque tinha um papel importante em uma de suas grandes paixões – o voo dos pássaros e o projeto de máquinas voadoras.[111] "Para apresentar a verdadeira ciência do movimento dos pássaros no ar", declarou, "é necessário primeiro apresentar a ciência dos ventos".[112]

Uma leitura cuidadosa das anotações de Leonardo sobre mecânica torna evidente que, para ele, os diferentes tipos de atrito estudados – o rangido de eixos e hastes nas máquinas, o atrito entre objetos em colisão e a resistência encontrada por corpos em movimento na água e no ar – tinham o mesmo efeito. Todos resultavam em "consumo de poder" ou dissipação de energia, como diríamos hoje. A observação fundamental de que, em qualquer processo físico, alguma energia se perde e não pode ser recuperada, observação que se tornaria uma pedra angular da termodinâmica 350 anos depois, vem repetidamente ilustrada nos manuscritos de Leonardo.

Na engenharia mecânica, assinala Leonardo, "precisamos deduzir do poder do instrumento a parte que se perde com o atrito em suas peças móveis",[113] e seus experimentos com objetos que ricocheteiam levaram-no a esta conclusão: "Aprendi, com base na percussão, que o movimento de queda excede o movimento de reflexo".[114] Uma demonstração particularmente elegante da dissipação da energia aparece no Manuscrito A, que contém algumas das primeiras pesquisas de Leonardo em mecânica. Num desenho simples (Fig. 5-11), ele compara a trajetória de

uma bola voando livremente pelos ares com a trajetória de outra que salta repetidamente, perdendo a cada salto uma certa quantidade de “poder”.

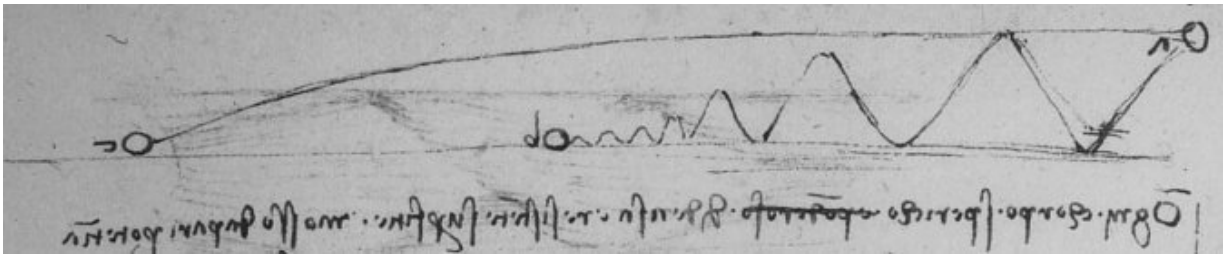


Figura 5-11: *Comparação entre as trajetórias de uma bola livremente arremessada e outra que salta, Ms. A, fólio 24r.*

Em seus estudos de engenharia mecânica, Leonardo desde cedo investigou a crença medieval de que era possível gerar energia em máquinas de moto-perpétuo. A princípio, aceitou essa ideia. Desenhou uma série de mecanismos complexos que mantivessem água em movimento constante por meio de vários sistemas de realimentação. Entretanto, quando compreendeu melhor o fenômeno da dissipação de energia, concluiu pela impossibilidade dessa tarefa.

“A água que desce”, explicou ele, “jamais subirá do lugar onde agora repousa até a altura de onde saiu em quantidade igual a seu peso”.[115] No fim, Leonardo passou a ironizar as tentativas de construir semelhantes máquinas: “Encontrei, entre as exageradas e impossíveis ilusões dos homens, a busca do moto-perpétuo, que alguns chamam de roda perpétua”.[116]

No século XIX, a segunda lei da termodinâmica foi primeiramente formulada em termos de dissipação de energia em motores térmicos, mas logo se percebeu que

seu alcance era bem maior.[117] Ela introduziu na física a ideia de processos irreversíveis, de uma “seta do tempo”, como veio a ser chamada. De acordo com a segunda lei, existe uma certa “tendência” nos fenômenos físicos. Como a energia mecânica se dissipa e não pode ser recuperada, os processos físicos avançam numa determinada direção – da ordem para a desordem. Para explicar essa direção matematicamente, os físicos introduziram uma quantidade nova, a “entropia”, que mede o grau de desordem e, portanto, o de evolução de um sistema físico. Em sua formulação mais geral, a segunda lei da termodinâmica estabelece que qualquer sistema físico isolado avançará espontaneamente na direção de uma entropia, ou desordem, cada vez maior.

Leonardo não apenas chegou a uma compreensão clara da dissipação da energia como intuiu também seu significado mais amplo. Ele sempre atentou, em especial, para o “consumo” de formas sob a influência de forças físicas durante longos períodos de tempo. Por exemplo, sua descrição detalhada da erosão das rochas provocada por rios e correntes – de fragmentos com ângulos agudos a seixos menores e arredondados que, eventualmente, se degradam em cascalho e areia fina – é uma ilustração perfeita de uma sequência “entrópica” (como diríamos nos dias de hoje) rumo a uma desordem cada vez maior.[118] A passagem inteira não ficaria deslocada num manual moderno de termodinâmica. O mesmo é verdadeiro para a vívida descrição que ele fez do desgaste das rochas pela ação de agentes atmosféricos: “A água consome as

montanhas e atulha os vales; se pudesse, reduziria a Terra a uma esfera perfeita."[119]

Ainda mais impressionante é o fato de Leonardo associar esses processos irreversíveis a uma concepção específica do tempo, como fariam os fundadores da termodinâmica 350 anos mais tarde. Os físicos dos séculos XIX e XX discutiram a ideia de uma direção do tempo, manifesta no avanço dos processos físicos da ordem para a desordem. Chamaram-na de "seta do tempo" para distingui-la da coordenada do tempo reversível da física newtoniana. Leonardo, empregando uma linguagem apenas ligeiramente diferente, introduziu a noção de qualidade física do tempo. Num fólio do Codex Arundel, rabiscou este curto lembrete para si mesmo: "Falar da qualidade do tempo como distinta de sua geometria."[120] A qualidade do tempo que ele tinha em mente era a de "consumidor de todas as coisas", ou seja, referia-se à irreversibilidade do tempo nos processos físicos de transformação e decadência.

A concepção do tempo como o consumidor de todas as coisas já pode ser encontrada nos primeiros escritos de Leonardo. Um fólio do Codex Atlanticus, datando por volta de 1480, contém uma passagem evocativa inspirada nas *Metamorfoses* de Ovídio, onde ele imagina a formosa Helena de Troia como uma mulher velha, a face devastada pela passagem do tempo:

> Ó tempo, consumidor de todas as coisas! Ó invejosa velhice, tu destróis, tu consomes tudo com os dentes afiados dos anos, aos poucos, numa morte lenta. Helena, vendo no espelho as rugas que a idade escavara em seu rosto, chorou e perguntou-se por que teria sido raptada duas vezes.[121]

Leonardo aplicou sua concepção qualitativa do tempo e, portanto, a de “movimentos de consumo” a três áreas principais: as transformações do corpo humano no curso da vida, as mudanças no corpo da Terra ao longo do tempo geológico e o desgaste por atrito das peças móveis das máquinas.[122] Sua ideia da transformação e consumo de formas, nessas três áreas, como manifestações diferentes de um processo universal antecipou o pensamento evolucionário na física em mais de três séculos, devendo ser considerada uma das maiores façanhas científicas de Leonardo.

PESO, FORÇA E MOVIMENTO

O peso era o segundo dos quatro poderes da natureza reconhecidos por Leonardo. As relações entre peso, força e movimento ocupavam o centro de sua atenção quando ele começou a estudar teoricamente a mecânica numa série de investigações empíricas da “ciência dos pesos” medieval. O principal instrumento dessas investigações era a balança; e o quadro teórico básico, a clássica lei da alavanca, de Arquimedes.[123]

De 1490 a 1500, quando pintava a *Última Ceia* em Milão, Leonardo empreendeu estudos detalhados de todas as partes da balança, experimentando com diversos tipos de suspensão e suportes dos braços, diferentes cordas e pesos, e assim por diante. Foi alterando sistematicamente cada variável para obter uma compreensão clara dos princípios que regem o aparelho. Mas não só isso, ele discutiu possíveis erros originados das diferenças entre o

tratamento matemático de uma balança e sua construção física concreta:

> A ciência dos pesos é levada ao erro pela prática, que em muitos casos não concorda com ela, não sendo também possível fazê-la concordar. Isso se deve aos eixos, graças aos quais se elabora a ciência das balanças com base nos pesos. Os eixos, segundo os antigos filósofos, eram vistos como dotados da natureza das linhas matemáticas e, em alguns lugares, como pontos matemáticos. Ora, pontos e linhas são incorpóreos, ao passo que a prática os trata como corpóreos, pois são o que a necessidade exige para suportar o peso dos próprios eixos mais o peso que se quer avaliar (...). Faço a lista desses erros abaixo.[124]

Leonardo cita então vários erros possíveis. Observa, por exemplo, que a linha central dos braços pode passar pelo fulcro, por baixo ou por cima dele. “Só a que passa pelo centro é perfeita”, explica então. “A que passa por cima é a pior; a que passa por baixo, menos ruim”.

Esses estudos meticulosos da balança permitiram a Leonardo não apenas calcular as forças e pesos necessários para se obter equilíbrio em diversos sistemas compostos, inclusive balanças, alavancas e polias,[125] mas também concluir que o peso de um corpo é idêntico à força de gravidade que atua sobre ele. “A força é sempre igual ao peso que a produz”, anotou no Codex Atlanticus.[126] Considerando-se que, de um modo geral, ele aceitava a visão aristotélica da gravidade, onde não havia o conceito de uma força real, a correta associação que estabeleceu, empiricamente, entre peso e força gravitacional é de fato notável.

A relação entre gravidade e movimento era de grande interesse para Leonardo, em seus estudos anatômicos, porque ele desejava compreender as sequências exatas dos movimentos que o corpo executa ao andar, correr, saltar e

praticar outras atividades.[127] Como preparação para análises detalhadas desses movimentos, Leonardo elaborou diversos cálculos para localizar o centro de gravidade (chamado “centro de massa” na mecânica moderna) em várias figuras geométricas.[128]

As regras e princípios para a determinação exata do centro de gravidade de triângulos, quadrados e outras figuras geométricas foram estabelecidos na Antiguidade por Arquimedes em seu tratado *Sobre o Equilíbrio dos Planos*. Leonardo seguiu Arquimedes de perto ao apresentar sugestões e provas da localização dos centros de gravidade, citando diversas passagens do grande clássico. Como Arquimedes, ele frequentemente dividia figuras geométricas em triângulos e usava a lei da alavanca para mostrar que pares desses triângulos se equilibram em determinado ponto. Pode mesmo ter construído modelos físicos de triângulos e colocado pesos iguais nos ângulos para descobrir seus centros de gravidade.

Leonardo não limitou suas investigações às figuras planas, como fez Arquimedes, mas determinou também os centros de gravidade de vários sólidos. Mais importante ainda, descobriu a localização exata do centro de gravidade do tetraedro, o sólido regular composto de quatro triângulos equiláteros. O argumento da prova de Leonardo se baseia na simetria do tetraedro e soa bem moderno aos nossos ouvidos.[129] Ele traça um “eixo” interno do centro da base da figura até o vértice oposto e conclui que, como a base é um triângulo equilátero, a distribuição da massa em torno desse eixo só pode ser simétrica em todas as direções. Portanto, o centro de gravidade deve estar em algum ponto do eixo. Em

seguida, observa que, dada a simetria do tetraedro como um sólido regular, o mesmo raciocínio se aplica a qualquer um de seus quatro eixos. Assim, o centro de gravidade deve se localizar no ponto de sua intersecção:

> O centro de gravidade do corpo de quatro bases triangulares fica na intersecção de seus eixos, na quarta parte do comprimento desses eixos.[130]

O fato de o ponto de intersecção dos quatro eixos cortar cada um deles na proporção 1:3 não se depreende desse argumento, nem há indício de que Leonardo tenha calculado a localização exata. O mais provável é que ele fizesse um modelo físico do tetraedro e seus eixos, notando que o centro de gravidade corta cada eixo em um ponto situado a uma distância de um quarto de seu comprimento a partir da base. Mas, independentemente de como possa ter obtido esse resultado, a prova do teorema de Leonardo é concisa e simples, representando sem dúvida uma de suas descobertas mais significativas em geometria.

CORPOS EM QUEDA

Durante os últimos anos de seu primeiro período em Milão, Leonardo não só mergulhou fundo no estudo da estática – a "ciência dos pesos" – como também examinou em detalhe o movimento dos corpos em queda. Segundo a visão aristotélica da gravidade, esse era um exemplo do movimento natural dos "pesos" em direção à Terra, mas Leonardo não deixou de observar que a queda livre sob a influência gravitacional é um movimento acelerado. Explicou esse fato nos termos da teoria medieval do ímpeto

ou impulso. Na maioria dos casos, o conceito de ímpeto fora aplicado ao movimento “violento”, isto é, aquele em que um objeto é forçado a mover-se contrariamente à sua tendência natural. Com efeito, o próprio Leonardo definia o ímpeto como “um poder impresso pelo motor no objeto movido”.[131] Mas, como já estabelecera a identidade de força e peso, não é de estranhar que aplicasse o conceito de ímpeto também ao movimento sob a influência gravitacional, vendo a aceleração de um corpo em queda como a impressão contínua do ímpeto pelo peso do corpo. “O ímpeto brota tanto do peso quanto da força”, explicou ele.[132]

Leonardo acreditou durante muito tempo que as relações “piramidais” ou lineares fossem universais na natureza, conforme já discutimos.[133] Por isso, não nos surpreende sua afirmação de que a velocidade de um corpo em queda aumenta na razão direta do tempo:

> O movimento natural dos corpos pesados, a cada grau de sua descida, adquire um grau de velocidade. Por tal motivo, à medida que vai ganhando força, esse movimento é representado pela figura de uma pirâmide.[134]

Sabemos que a frase “a cada grau de sua descida” refere-se a unidades de tempo porque, em página anterior do mesmo caderno de notas, Leonardo escreveu: “Um peso que desce livremente, a cada grau de tempo, adquire (...) um grau de velocidade.”[135] Ou seja, Leonardo postula aqui a regra matemática segundo a qual, para os corpos em queda livre, existe uma relação linear entre velocidade e tempo.

As conclusões de Leonardo são absolutamente corretas. Na linguagem matemática de hoje, dizemos que a velocidade de um corpo em queda é uma função linear do tempo e escrevemo-la simbolicamente como $v = gt$, onde g

é a aceleração gravitacional constante. Essa linguagem não estava disponível para Leonardo. O conceito de função como relação entre variáveis só foi desenvolvido no final do século XVII. Mesmo Galileu descrevia a relação funcional entre velocidade e tempo para um corpo em queda na linguagem da proporção, como fizera Leonardo 140 anos antes.[136]

Leonardo antecipou outra descoberta pela qual Galileu ficou famoso. Em vez de tentar verificar experimentalmente, com objetos em queda, sua afirmativa sobre a aceleração gravitacional (o que seria quase impossível com os relógios rudimentares da época), teve a mesma ideia brilhante de Galileu um século depois – a de que uma bola rolando por um plano inclinado se acelera do mesmo modo que um objeto em queda livre, apenas mais lentamente, e isso permite medir o movimento acelerado com razoável precisão mesmo se utilizando instrumentos simples. “Embora o movimento seja oblíquo”, raciocinou ele, “sofre a cada grau um aumento de movimento e velocidade em progressão aritmética”.[137]

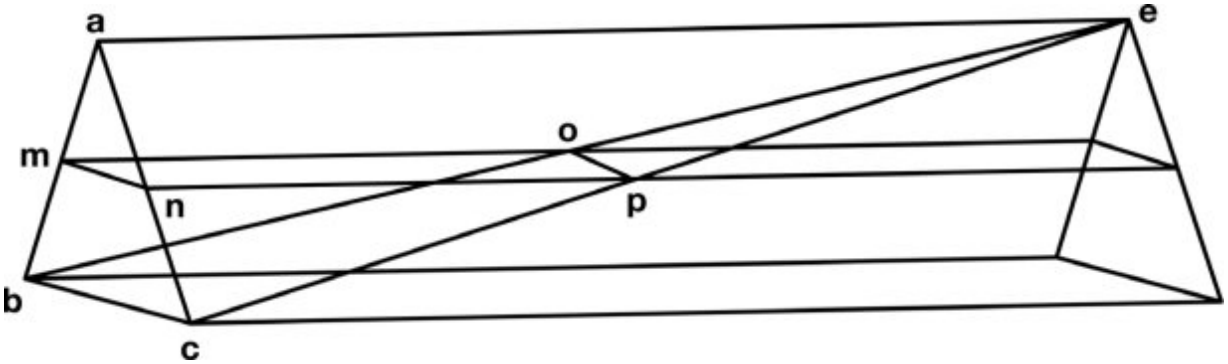


Figura 5-12: *Movimento acelerado num plano inclinado, Ms. M, fólio 42v (reconstituição de Clagett).*

A ilustração de Leonardo, logo após essa afirmativa, é bastante engenhosa (ver Fig. 5-12). Ele desenhou o plano inclinado como um triângulo isósceles (*ebc*) que deve representar a progressão aritmética da velocidade no tempo. O triângulo forma uma face de uma pirâmide irregular cuja face oposta é um triângulo vertical (idêntico ao *abc*), representando a relação linear entre velocidade e tempo para a queda vertical correspondente. As relações corretas entre as variáveis relevantes podem ser facilmente identificadas no diagrama de Leonardo. As velocidades no fim das descidas vertical e oblíqua são iguais (ambas representadas por *bc*), ao passo que os tempos necessários para a aquisição das velocidades (representados pelas arestas dos dois triângulos) são claramente diferentes. Além disso, Leonardo assinalou as velocidades medianas (*mn* = *op*) para mostrar que as mesmas relações se aplicam a todas as velocidades intermediárias ao longo das descidas vertical e oblíqua.

Esse diagrama do plano inclinado é um exemplo notável da grande capacidade de Leonardo para analisar os elementos de fenômenos complexos e apresentá-los visualmente com a maior clareza. Todavia, é du - vidoso que ele tenha realmente feito o experimento com bolas rolando por planos inclinados, como Galileu. Se tivesse feito, observaria sem dúvida que as distâncias dos corpos em queda aumentam com os quadrados dos tempos e não linearmente. Ao contrário, errou ao sustentar que “a cada quantidade de tempo dobrada, dobra também o comprimento da descida”.[138]

Conforme mencionado anteriormente, Galileu cometeu o mesmo erro em seus primeiros trabalhos, mas corrigiu-o depois de experimentar com planos inclinados.[139] O fato de Leonardo se apegar à crença numa relação linear entre as distâncias atravessadas por corpos em queda e os tempos decorridos parece indicar que ele nunca realizou esses experimentos tão brilhantemente esboçados. Determinar as distâncias cobertas por bolas rolando em planos inclinados durante sucessivos intervalos de tempo teria sido relativamente fácil, mas medir suas velocidades cada vez maiores durante os mesmos intervalos de tempo representaria um desafio considerável. Com efeito, Galileu só chegou à plena compreensão da relação linear entre velocidades instantâneas e tempos com muito esforço e vários anos depois de concluir que as distâncias atravessadas pelos corpos em queda aumentam com os quadrados dos tempos.[140]

Além do plano inclinado, Galileu usou o pêndulo como importante ferramenta para analisar os efeitos da gravidade sobre o movimento. Leonardo também estudou o movimento do pêndulo e utilizou-o como regulador em relógios.[141] Mas não conseguiu reconhecer uma de suas principais propriedades: o período de oscilação é independente da massa do prumo. Galileu, como se sabe, usou essa propriedade do pêndulo para demonstrar que, no vácuo, todos os objetos caem com a mesma aceleração e, portanto, atingem o solo ao mesmo tempo, independentemente de suas massas.

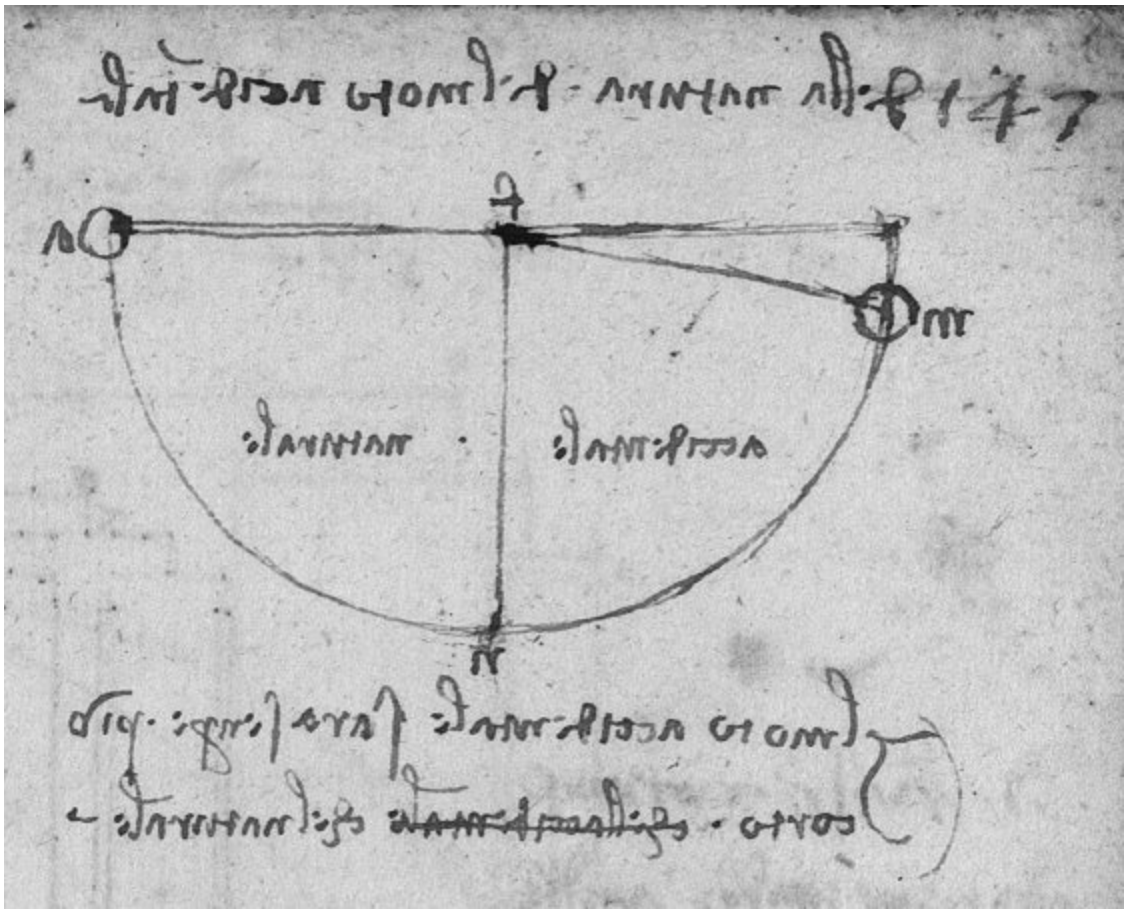


Figura 5-13: *Perda de energia no movimento pendular, Codex Madri I, fólio 147r.*

Ainda assim, Leonardo fez algumas descobertas significativas sobre o movimento pendular. Descreveu-o como uma interação de movimento natural (para baixo) e de movimento acidental (para cima), percebendo que, devido à perda inevitável de energia pelo atrito, "o movimento acidental será sempre mais curto que o natural".[142] Essa afirmativa, num fólio do Codex Madri I, é ilustrada por um desenho simples (Fig. 5-13) que mostra claramente a perda de energia na subida. Essa é outra de suas muitas ilustrações da dissipação da energia.

No mesmo fólio, de forma ainda mais notável, Leonardo analisa a taxa de diminuição do arco do pêndulo sob a

influência do atrito e observa que, para arcos pequenos, as oscilações são mais uniformes: “Quanto menor for o movimento natural de um peso suspenso, mais o movimento acidental seguinte será igual em comprimento.” De novo, a observação é ilustrada com grande clareza num pequeno desenho (Fig. 5-14). Graças a essa descoberta da regularidade crescente dos movimentos pendulares para arcos pequenos e, portanto, da regularidade aproximada desses movimentos, Leonardo antecipou as formulações teóricas de Galileu e as aplicações práticas no desenvolvimento dos relógios de pêndulo em cerca de um século e meio.

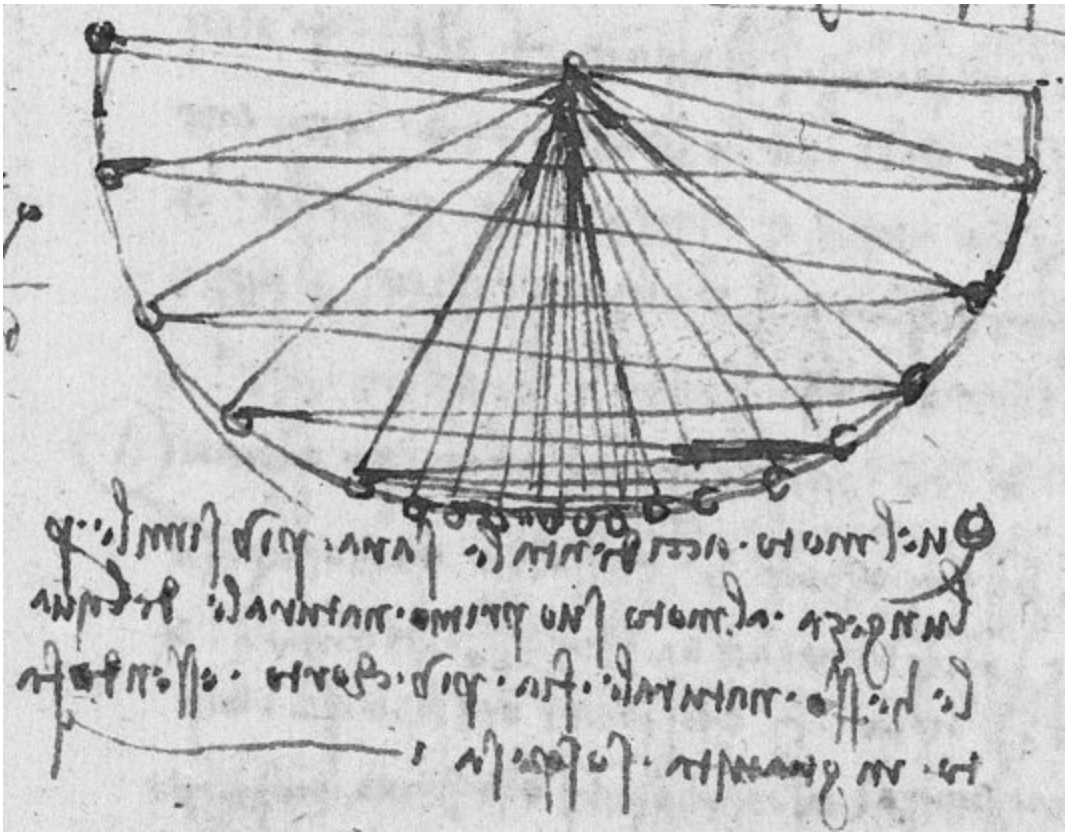


Figura 5-14: *Regularidade aproximada dos movimentos pendulares para arcos pequenos, Codex Madri I, fólio 147r.*

Finalmente, ainda no mesmo fólio do Codex Madri, Leonardo compara a trajetória de um pêndulo, com sua interação de movimentos naturais e acidentais, à trajetória curva de uma pedra. Embora sua comparação detalhada das duas trajetórias contenha alguns erros, a observação de que em ambos os casos ocorre uma interação similar entre gravidade e impulso é notável. No século XVII, Galileu faria a mesma comparação em seu famoso *Diálogo sobre os Dois Grandes Sistemas do Mundo*.

TRAJETÓRIAS BALÍSTICAS

O estudo das trajetórias balísticas era de especial interesse para Leonardo em sua função de engenheiro militar. Em 1502, quando tinha 50 anos e já adquirira grande fama como artista e engenheiro, foi contratado pelo papa para viajar pela Itália central, inspecionar as barricadas, canais e outras fortificações, e sugerir melhorias.[143] Leonardo projetou fortificações novas e engenhosas. Em vez de castelos de paredes altas e verticais, imaginou casamatas baixas, providas de bastiões, numa série de curvas concêntricas para minimizar o impacto das balas de canhão.[144]

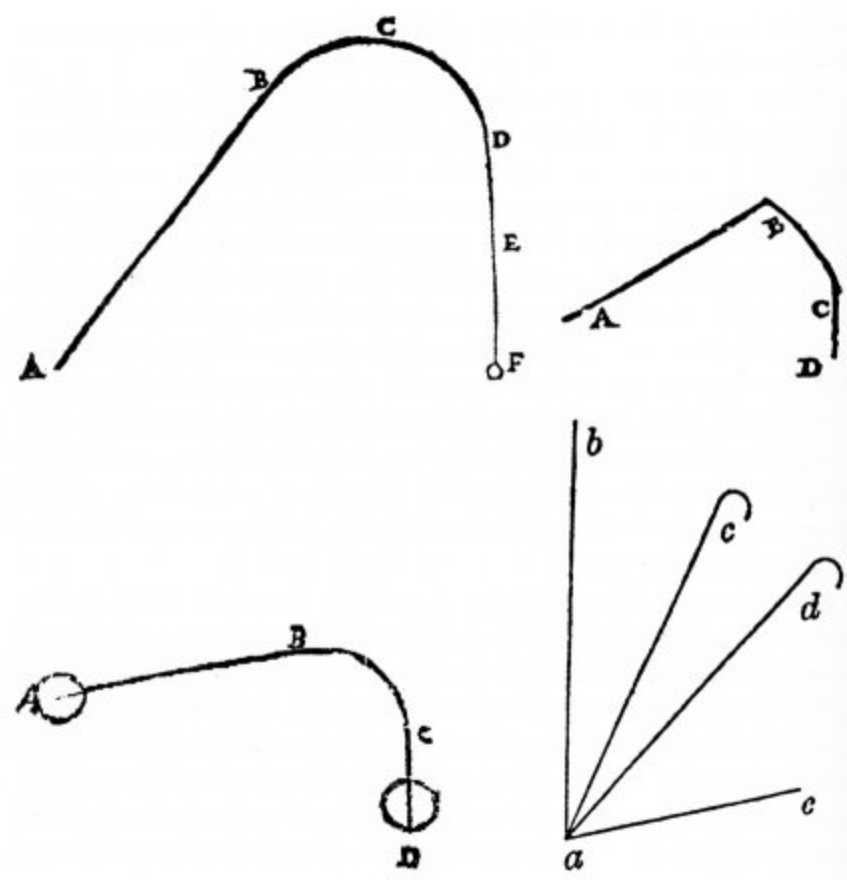


Figura 5-15: *Trajetórias balísticas segundo Niccolò Tartaglia (a), 1537; Girolamo Cardano (b), 1550; Bernardini Baldi (c), 1621 e Galileu Galilei (d), 1592; extraído de Bertoloni-Meli, 2006.*

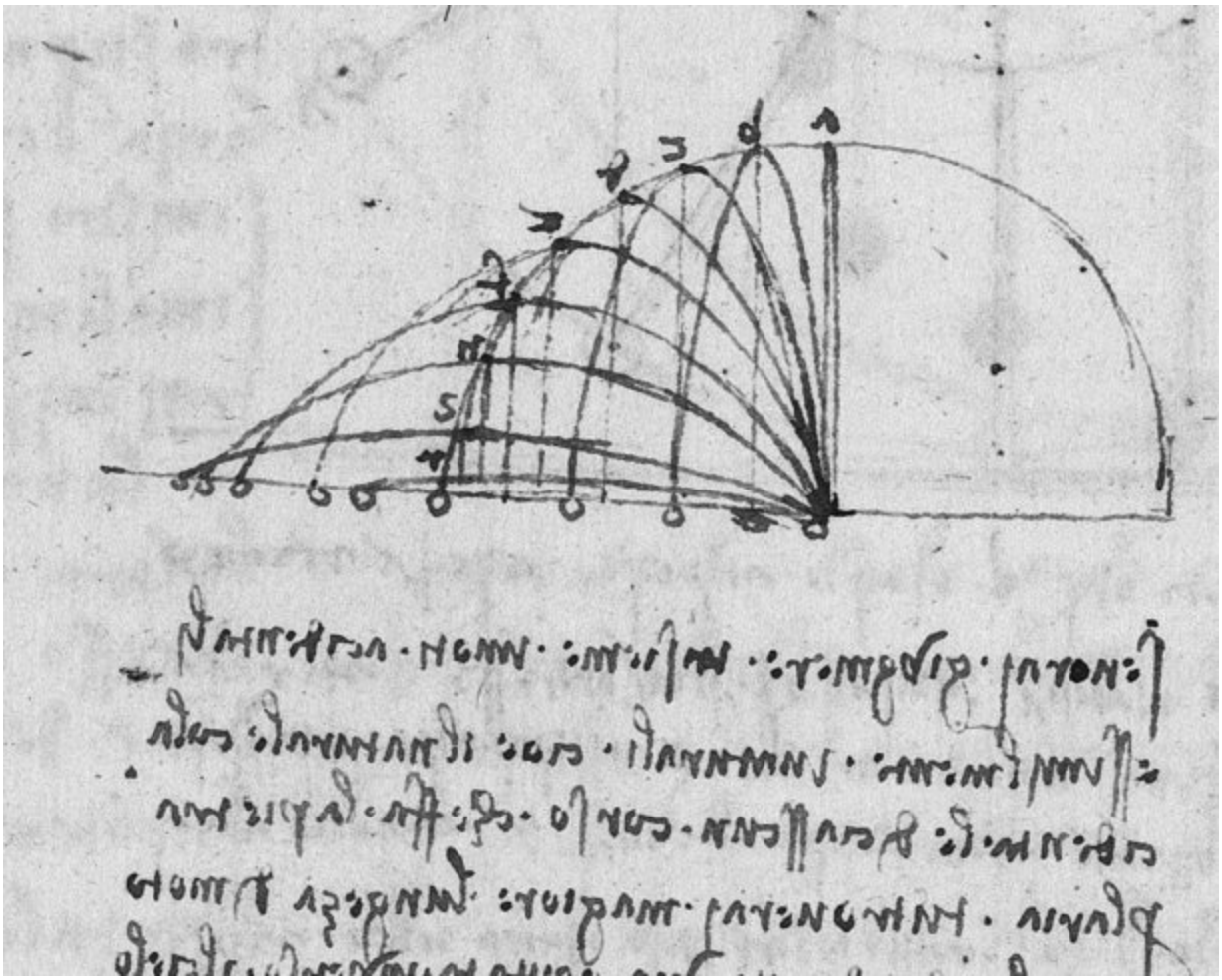


Figura 5-16: *Trajetórias parabólicas em diferentes ângulos de lançamento, Codex Madri I, fólio 147r. Como sempre nos diagramas de Leonardo, a direção do movimento é da direita para a esquerda.*

Para elaborar com tanta eficiência esses projetos militares, Leonardo deve ter tido um conhecimento preciso das trajetórias dos projéteis – um assunto, na época, muito mal compreendido e cheio de conclusões errôneas. Durante o Renascimento e até o final do século XVII, a trajetória de uma bala de canhão era vista, em todos os tratados militares sobre artilharia, subindo num ângulo ao longo de uma linha reta, seguida por uma breve seção curva, e depois caindo numa linha perfeitamente vertical.[145] Diversas variações desse quadro foram propostas por matemáticos

nos séculos XVI e XVII. Todas elas – mesmo a de Galileu num de seus primeiros trabalhos – descreviam a porção ascendente da trajetória como uma linha reta (ver Fig. 5-15).

Leonardo, ao contrário, não deixou de reconhecer (sem lhe dar nome) a natureza parabólica das trajetórias balísticas. No fólio do Codex Madri I citado anteriormente, sua justaposição da trajetória de um pêndulo à de uma pedra arremessada em arco é seguida pelo belo desenho de uma série de trajetórias balísticas em diferentes ângulos de lançamento (Fig. 5-16). As formas parabólicas dessas trajetórias são claramente visíveis.

Leonardo não tinha as ferramentas matemáticas para calcular essas formas e, com o equipamento experimental disponível na época, não poderia determiná-las monitorando os percursos de balas de canhão de verdade. Entretanto, usou seus poderes de análise científica e sua maneira sistêmica de pensar para descobrir uma solução engenhosa para o problema. Em vez de estudar pedras ou balas de canhão disparadas, estudou jatos de água, dos quais a trajetória pode ser facilmente vista. Percebeu que os jatos eram compostos de partículas de água sujeitas às mesmas forças dos movimentos natural e acidental (de gravidade e inércia, como diríamos hoje) que as balas de canhão e as pedras.

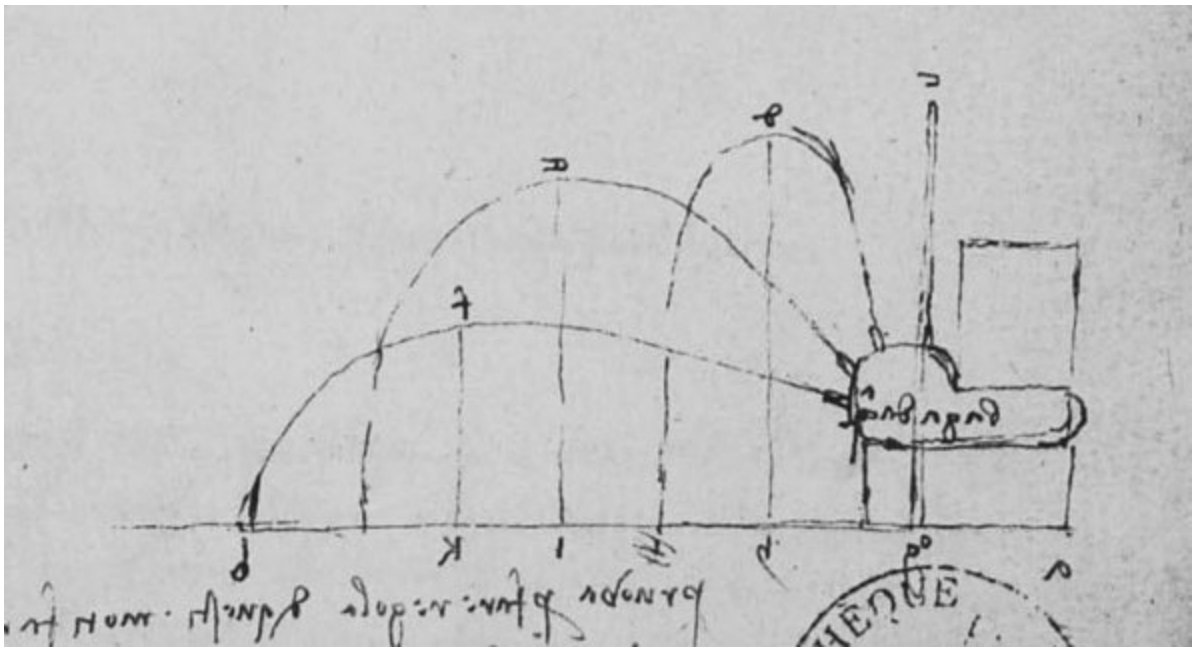


Figura 5-17: *Jatos de água parabólicos com resistência do ar, Ms. C, fólio 7r.*

No Manuscrito C, escrito pouco antes do Codex Madri I, Leonardo descreve como estudará sistematicamente as trajetórias dos jatos de água: “Testar a fim de estabelecer uma regra para esses movimentos. Fazer o teste com uma bolsa de couro cheia de água e provida de pequenos tubos de mesmo diâmetro interno, dispostos numa única linha.”[146] O desenho que acompanha essas frases (Fig. 5-17) mostra a bolsa com a água espirrando de quatro pequenos bicos colocados em ângulos diferentes, inclusive um na vertical. Fica evidente, pelo desenho, que o olhar aguçado de Leonardo percebera não apenas as formas parabólicas corretas dos jatos de água, mas também, o que é mais notável, suas leves distorções devidas à resistência do ar. Podem ser vistos claramente, no desenho, o achatamento das porções ascendentes e o encurvamento das porções descendentes.

A exatidão com que Leonardo desenhou essas trajetórias é realmente impressionante. Depois dele, a forma parabólica das trajetórias balísticas voltou a ser observada por Galileu, em 1609, e foi provada matematicamente por seu discípulo mais famoso, Evangelista Torricelli, em 1644. Torricelli redescobriu também, 150 anos depois de Leonardo, a distorção das trajetórias balísticas devida à resistência do ar, mas o próprio Galileu não chegou a levar em conta esse efeito. O cálculo exato da curva balística, considerando-se a resistência do ar, teve de esperar por Isaac Newton, que o publicou nos *Principia* em 1687.

A ORIGEM DAS FORÇAS FÍSICAS

Depois de estabelecer a identidade do peso do corpo com a força de gravidade que atua sobre ele, era natural para Leonardo considerar a força como seu terceiro poder da natureza, depois do movimento e do peso.

A origem das forças físicas foi uma das questões mais persistentes e intrigantes na história da mecânica clássica. Galileu não atacou esse problema, limitando suas pesquisas ao movimento dos corpos materiais sob a influência de forças diversas. Essa omissão foi criticada por Descartes, que preceituava uma visão amplamente mecanicista do mundo, na qual fenômenos vivos e não vivos eram reduzidos aos movimentos e contatos mútuos de pequenas partículas materiais. Em especial, Descartes explicou a força da gravidade em termos de uma série de impactos de

partículas minúsculas contidas em fluidos materiais sutis que permeavam o espaço.[147]

A teoria de Descartes gozou de muito prestígio durante a maior parte do século XVII, até Newton substituí-la por sua concepção da gravidade como uma força fundamental de atração entre todos os tipos de matéria, atuando de longe e diminuindo com o quadrado da distância. A concepção de Newton também foi criticada por vários de seus contemporâneos, chocados ante a ideia de que uma força de atração agiria de longe sem ser transmitida por meio algum. O famoso arquiteto e matemático Christopher Wren, por exemplo, teria "sorrido da crença do Sr. Newton de que [a gravidade] não ocorre por meios mecânicos, mas foi originalmente introduzida pelo Criador".[148] A solução definitiva desse problema espinhoso só foi dada com o desenvolvimento do conceito de campo elaborado por Faraday e Maxwell no século XIX e com a teoria da gravidade de Einstein (sua teoria geral da relatividade) no século XX.

Leonardo, que permanecia em grande parte no quadro aristotélico e não era molestado pela divisão fundamental entre mente e matéria, a ser introduzida um século mais tarde por Descartes, via a questão da origem das forças físicas de maneira muito diferente. Uma vez que a queda dos corpos, o fluxo da água, a ascensão do ar e o sopro do vento eram considerados movimentos produzidos pelas tendências naturais desses elementos a voltar a seus devidos lugares, o problema se reduzia a explicar a origem das forças "acidentais" ou "violentas" que perturbavam o equilíbrio dos elementos.

Para Leonardo, a principal força acidental era a dos músculos dos animais e humanos, aliás uma das poucas fontes de energia na época. A origem da força muscular (em homens e animais) estava na alma, de onde era transmitida aos músculos por impulsos invisíveis, imateriais, que percorriam os nervos sensórios e motores sob a forma de ondas.[149] Em suma, a origem da força não era material. “O peso é corpóreo”, explicou ele, “e a força é incorpórea; o peso é material e a força é espiritual”.[150] Conforme já mencionei, Leonardo muitas vezes empregava o termo “espiritual” no sentido de “não material” e invisível; eis como ele descreve a natureza última das forças acidentais:

> A força nada mais é que um poder espiritual, uma potência invisível criada e infundida, mediante violência externa, por corpos sensientes em corpos não sensientes.[151]

Outras definições igualmente claras e articuladas de força acidental aparecem com frequência nos cadernos de notas de Leonardo. Mas, devido a seu uso da palavra “espiritual”, houve confusão em torno de seu conceito de força por parte de inúmeros historiadores. Da perspectiva mecanicista deles, as declarações de Leonardo parecem revelar uma dimensão espiritual ou mesmo esotérica em seu pensamento. Essa dimensão talvez possa ser vislumbrada em algumas das afirmações filosóficas de Leonardo, mas não, a meu ver, em seu conceito de forças físicas. A definição de força de Leonardo não é nada ambígua, pois deriva de evidências empíricas e condiz com o quadro geral de seu pensamento científico.

FORÇA, MOVIMENTO E TRABALHO

Trabalhando com engenharia mecânica, Leonardo teve incontáveis oportunidades de observar os efeitos de diversas forças em máquinas como a polia e a alavanca. Ele atentou, em especial, para a transmissão de força e movimento de um plano a outro.[152] É típico da mentalidade científica de Leonardo ter ele usado esse conhecimento empírico não só para aperfeiçoar máquinas já existentes, mas também para extrair princípios gerais de mecânica de suas observações.

Um desses princípios era a conservação do trabalho, um caso especial de conservação da energia. Vários anos depois de seus comentários sobre a conservação da energia, no Codex Madri I, Leonardo declarou no caderno de bolso conhecido como Manuscrito F:

> Se uma força move um corpo por certa distância durante certo tempo, essa mesma força moverá metade desse corpo durante o mesmo tempo por uma distância duas vezes maior (...) [ou] a distância toda durante metade desse tempo.[153]

Essa afirmação da conservação do trabalho corresponde plenamente às nossas modernas definições de trabalho como “força vezes distância” e de força como “trabalho mais tempo”.

Ainda mais intrigante é o fato de Leonardo descobrir um princípio que se tornou conhecido como a terceira lei do movimento de Newton, duzentos anos mais tarde. Ele estabelece que “para cada ação há uma reação igual e oposta”. Em outras palavras, as forças físicas sempre se manifestam em pares idênticos e contrários. Leonardo não

formulou essa observação como um princípio geral, mas deixou-o implícito em muitos exemplos concretos.

Um dos cadernos de notas mais antigos, o Manuscrito A, escrito por volta de 1490 durante seus primeiros anos em Milão, traz um comentário sobre os ricochetes de uma bolinha de vidro numa pedra lisa e polida. Em sua análise, Leonardo declara que a força do ricochete é igual à força de seu impacto.[154] Mais ou menos na mesma época, ele estudou o voo dos pássaros e desenvolveu seus primeiros projetos de máquinas voadoras. Observando os movimentos das asas de uma águia, escreveu: “O objeto exerce contra o ar a mesma força que o ar exerce contra o objeto.”[155] Cerca de vinte anos depois, reconheceu o mesmo princípio em relação à força da água contra um remo: “A quantidade de movimento feita por um remo contra a água parada é igual à quantidade de movimento feita pelo fluxo da água contra um remo imóvel.”[156]

Por fim, ele antecipou em vários séculos um princípio da mecânica clássica bem mais abstrato e geral. O Manuscrito G contém esta formulação concisa, derivada da observação dos corpos em queda: “Toda ação natural se faz pelo caminho mais curto.”[157] Um postulado mais complexo e enfático se encontra num fólio do Codex Atlanticus em que Leonardo discute experimentos com raios luminosos:

> Ó maravilhosa necessidade, com que suprema razão obrigas todos os efeitos a juntar-se às suas causas! Por uma lei superior e irrevogável, todas as ações naturais te obedecem executando a operação mais curta.[158]

O entusiasmo de Leonardo por esse princípio justificava-se plenamente. Séculos mais tarde, ele se tornaria um dos princípios mais importantes da mecânica clássica. Foi

formulado no século XVII pelo grande matemático Pierre de Fermat, que o aplicou à óptica geométrica, como fizera Leonardo antes dele. Conhecido hoje como princípio de Fermat ou “princípio do tempo mínimo”, ele afirma que a luz sempre percorre o caminho mais rápido. No século XIX, o princípio foi reformulado pelo físico e matemático William Hamilton numa linguagem matemática bem mais abstrata. O princípio de Hamilton, também conhecido como “princípio da ação mínima”, é válido para todos os sistemas físicos.[159]

Algumas das afirmações de Leonardo parecem implicar que o caminho mais rápido para um processo natural é também o mais curto, mas esse nem sempre é o caso. Em rigor, o princípio de Leonardo não pode ser visto como uma formulação primitiva dos princípios de Fermat ou de Hamilton. Entretanto, compartilha com ambos a ideia de uma certa propensão nos fenômenos naturais, chamada de “necessidade” por Leonardo, a qual pode ser medida observando-se que o valor de uma quantidade, ou variável, se torna um mínimo. O nível de abstração dessa ideia, claramente articulada nos escritos de Leonardo, é verdadeiramente notável para a época.

PERCUSSÃO – O QUARTO PODER DA NATUREZA

O conceito de “percussão” de Leonardo, seu quarto “poder” da natureza, corresponde ao que conhecemos hoje por “impacto” e refere-se a um amplo leque de fenômenos. Inclui, por exemplo, o badalar de sinos e a vibração de pratos; o impacto do martelo contra o prego e outras superfícies; o entrechoque de bolas, bem como o ricochete

de uma bola numa superfície dura; e até os efeitos destrutivos de morteiros, da explosão inicial aos impactos das balas de canhão e ondas de choque. Além disso, Leonardo usa “percussão” – ou, mais frequentemente, “força de percussão” e “poder de percussão” – para denotar a energia transferida no processo de impacto, ou seja, como o equivalente do moderno conceito de energia cinética.

Em todos os seus estudos dos fenômenos de impacto, Leonardo deu atenção especial à transferência de energia de um corpo, ou meio, para outro, e também à consequente dissipação dessa energia. Notou que a transferência de energia ocorre no processo de impacto quando um movimento inicial cessa bruscamente: “O golpe nasce da morte do movimento.”[160]

Numa série de experimentos, ele golpeou vários objetos com um martelo a fim de descobrir quanto da “força de percussão” era absorvida pelo objeto e qual a probabilidade de este se quebrar, dependendo de seus suportes e do ponto de aplicação do golpe. Num dos casos, observou: “A mão que segura uma pedra golpeada não sofre tanto quanto sofreria se recebesse o golpe diretamente.”[161] Em outro exemplo de percussão com martelo, demonstrou que a energia cinética do impacto se transforma em calor:

> Se malharmos uma barra grossa de ferro na bigorna, várias vezes e no mesmo ponto, conseguiremos acender um fósforo no lugar golpeado.[162]

Para o caso extremo da explosão, Leonardo deu descrições vívidas e detalhadas dos poderes destrutivos da onda de choque, como nesta passagem do Codex Atlanticus:

> Se dispararmos uma pequena bombarda dentro de um pátio murado, qualquer vaso que ali estiver ou qualquer vidraça coberta com panos que ali houver se estilhaçará imediatamente; os telhados se erguerão ligeiramente das traves; as paredes e o piso se sacudirão como num grande terremoto; todas as teias de aranha se desprenderão; animais de pequeno porte poderão morrer e todo corpo que contiver ar, nas imediações, sofrerá algum dano na hora.[163]

A percussão desempenhou também um papel fundamental nos estudos de acústica que Leonardo empreendeu. Como discuti em *A Ciência de Leonardo da Vinci*, ele observou a partir de experimentos com sinos, tambores e outros instrumentos musicais que o som sempre é produzido por "um golpe em um objeto ressoante" e deduziu daí, corretamente, que a percussão provoca um movimento oscilante no ar ao redor.[164] Além disso, descreveu pormenorizadamente o fenômeno da ressonância:

> O golpe dado no sino faz um outro sino similar a ele responder e mover-se um pouco. E a corda de um alaúde, ao soar, produz resposta e movimento em outra corda similar de tom similar em outro alaúde. E isso você perceberá ao colocar uma palha na corda que é similar àquela soada.[165]

As observações de sinos e cordas de alaúde ressonantes sugeriram a Leonardo o mecanismo geral da propagação e percepção do som – da percussão inicial e das ondas resultantes no ar à ressonância do tímpano. No Manuscrito C, ele ilustrou sua descoberta com um pequeno e encantador desenho (Fig. 5-18) no qual a geração, propagação e percepção das ondas sonoras são representadas simbolicamente por três martelinhos que golpeiam um sino, uma parede refletora e um ouvido.

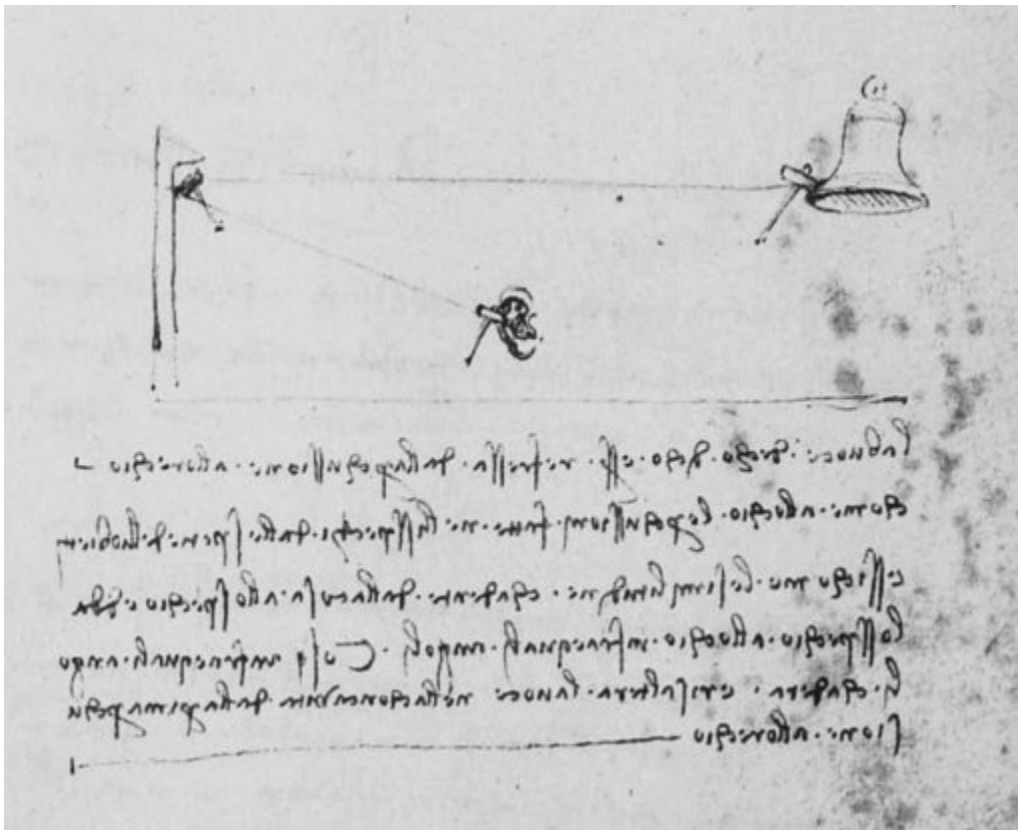


Figura 5-18: *Propagação das ondas sonoras de um sino para o ouvido, Ms. C, folio 16r.*

A percussão está também na origem dos experimentos de Leonardo com o arremesso de seixos nas águas calmas de um lago. Sua análise bastante precisa dos fenômenos subsequentes inclui descrições pormenorizadas do impacto do seixo, da geração de movimentos para cima e para baixo das partículas de água, da propagação da "força de percussão" em ondas circulares e de seu "poder" decrescente, à medida que a energia cinética do impacto se dissipa por causa da viscosidade do líquido.[166]

Em seus estudos da percussão, Leonardo não apenas analisou as transferências e transformações da energia cinética em vários fenômenos de impacto como tentou determinar relações quantitativas entre a massa e a

velocidade de um objeto em colisão, de um lado, e o dano que o “poder de percussão” (energia cinética) causava por ocasião do impacto, de outro. Para tanto, soltou vários pesos de diferentes alturas sobre uma placa de chumbo e mediu o tamanho das ranhuras produzidas por seu impacto.[167]

Em outra série de experimentos, atirou flechas de diferentes pesos a partir de diversas alturas e mediu as penetrações das hastes no solo macio, “sendo o solo de resistência uniforme e as hastes, de forma idêntica”.[168] Para obter essa uniformidade, fabricou flechas de hastes ocas iguais e encheu-as de cascalho de pesos variados. Com base nesses experimentos, Leonardo concluiu acertadamente que o “poder de percussão” é proporcional ao peso do objeto em queda é à altura da descida.

A colisão de bolas de bilhar e objetos similares foi outro enfo - que importante nas pesquisas sobre a percussão que Leonardo empreendeu. Ele distinguiu colisões entre dois objetos móveis de colisões entre uma bola e uma parede fixa ou outro objeto pesado (isto é, o fenômeno do ricochete):

> Há dois tipos de percussão: quando um objeto foge do projétil que o golpeou e quando um projétil volta depois de bater num objeto.[169]

Leonardo estudou ambos os tipos de colisão em profundidade e nas mais diversas variações. Num fólio do Manuscrito A (Fig. 5-19), esboçou mais de dez exemplos de bolas sólidas e quebradiças de diferentes massas que colidem em várias velocidades e ângulos de incidência. As breves descrições verbais que acompanham cada esboço

deixam claro que se trata de registros de experimentos sistemáticos com colisões elásticas e inelásticas, como hoje são chamadas.

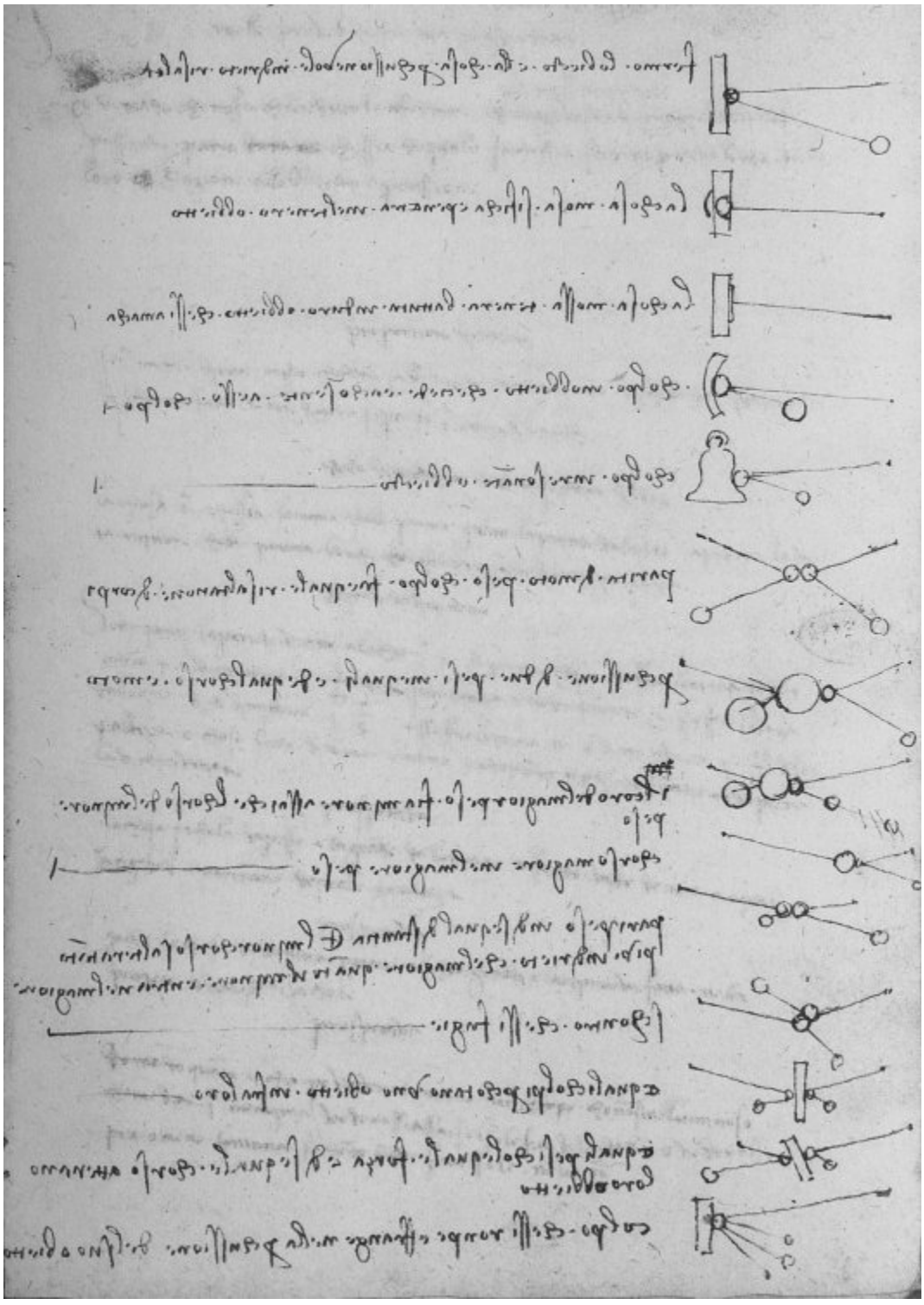


Figura 5-19: *Estudos de colisões elásticas e inelásticas, Ms. A, fólio 8r.*

Com base nesses experimentos, Leonardo tentou determinar relações quantitativas entre as massas,

velocidades e ângulos das bolas em colisão. Às vezes, equacionava problemas de colisão numa linguagem clara e concisa, como na seguinte passagem:

> A bola *a* se move com três graus de velocidade; a bola *b*, com quatro. Pergunta-se: em qual medida essa percussão difere daquela em que a bola *b* ficaria parada em vez de se aproximar da bola *a* com os ditos quatro graus de velocidade?[170]

Em outras passagens, Leonardo estabeleceu regras gerais para as colisões elásticas. Um fólio do Codex Leicester, por exemplo, contém estas afirmações:

> Se o percussor é igual e similar ao percutido, passa todo o seu poder ao percutido, que foge irado do local da percussão, deixando ali seu percussor. Mas se o percussor – similar, mas não igual ao percutido – é maior, não perde completamente o impulso depois da percussão, restando a quantidade pela qual ele excede a quantidade do percutido. E se o percussor é menor que o percutido, ricocheteia por maior distância que o percutido na quantidade em que o percutido excede o percussor.[171]

É instrutivo examinar as três afirmações dessa passagem mais detalhadamente. A primeira é uma descrição precisa de uma colisão elástica de duas bolas de massa igual, uma móvel e a outra estacionária, na qual o "poder" (energia cinética) da bola móvel se transfere inteiramente para o alvo estacionário durante o choque. De fato, a descrição de Leonardo é a resposta certa ao primeiro problema colocado na citação precedente.

As outras duas afirmações da passagem do Codex Leicester descrevem duas colisões entre bolas de massas desiguais. Na primeira, a bola móvel é mais pesada que o alvo estacionário; na segunda, mais leve. Aqui, as descrições de Leonardo estão corretas sob o aspecto qualitativo, mas obviamente ele se debate com o problema

de formular relações precisas entre quantidades como massa, velocidade e *momentum*, que possuem dimensões diferentes. Conforme mencionado anteriormente, isso continuaria representando um sério desafio para os cientistas durante mais dois séculos depois de Leonardo.[172]

Com efeito, a análise matemática exata dos fenômenos de impacto teria de aguardar o século XVII, quando Christiaan Huygens recorreu às leis da conservação da energia e do *momentum*, formuladas como equações algébricas, para determinar as leis corretas das colisões elásticas.

Os fenômenos de ricochete, em que um objeto colide com uma parede sólida, apresentavam um problema mais fácil aos filósofos naturais porque envolvem menos variáveis. Importante para as descrições da percussão e do ricochete, de Leonardo, era a regra segundo a qual o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A partir de suas primeiras pesquisas em mecânica, ele várias vezes invocou essa regra fundamental, hoje conhecida como lei de reflexão. Uma afirmativa sucinta, registrada por volta de 1500, pode ser encontrada no Codex Arundel:

> O ângulo descrito pelo movimento refletido dos corpos pesados é igual ao ângulo descrito pelo movimento incidente.[173]

No Manuscrito A, redigido dez anos antes, temos uma passagem similar: “A linha de percussão e a linha de seu ricochete ficam no meio de ângulos iguais.”[174] O significado dessa frase talvez seja menos óbvio, mas vem ilustrado com clareza por um desenho (Fig. 5-20) e acompanhado por uma descrição mais minuciosa:

> Se a bola *b* for arremessada contra *c*, voltará pela linha *cb*, descrevendo necessariamente ângulos iguais na parede *fg*. E se for arremessada pela linha *bd*, voltará pela linha *de*; assim, a linha de percussão e a linha de ricochete formarão um ângulo na parede *fg* situado no meio de dois ângulos iguais, pois *d* aparece no meio de *m* e *n*.

A lei de reflexão foi originalmente formulada em óptica pelo grande matemático árabe Alhazen (*Ibn al-Haitham*), cuja obra em sete volumes, *Kitab al-Manazir* ("Livro de Óptica"), estava disponível na Renascença em tradução latina e foi discutida por vários filósofos europeus. Leonardo conheceu o trabalho de Alhazen por intermédio deles e usou amplamente a lei da reflexão em suas pesquisas de espelhos esféricos e parabólicos, nas quais produziu uma série de diagramas belos e precisos.[175]

Mas Leonardo não se contentou com isso. Foi o primeiro a reconhecer a ampla generalidade da lei de reflexão, aplicando-a não apenas à mecânica e à óptica, mas também à acústica e à hidrodinâmica. No mesmo fólio do Manuscrito A em que discute o ricochete de uma bola arremessada contra uma parede, ele acrescenta esta breve nota: "A voz lembra um objeto visto no espelho."[176] Ou seja, a lei de reflexão se aplica também à luz e ao som. Vários anos depois, Leonardo usou o mesmo raciocínio para explicar o ricochete de um jato de água numa parede, observando, no entanto, que um pouco da água, depois da reflexão, espirra como um redemoinho.[177]

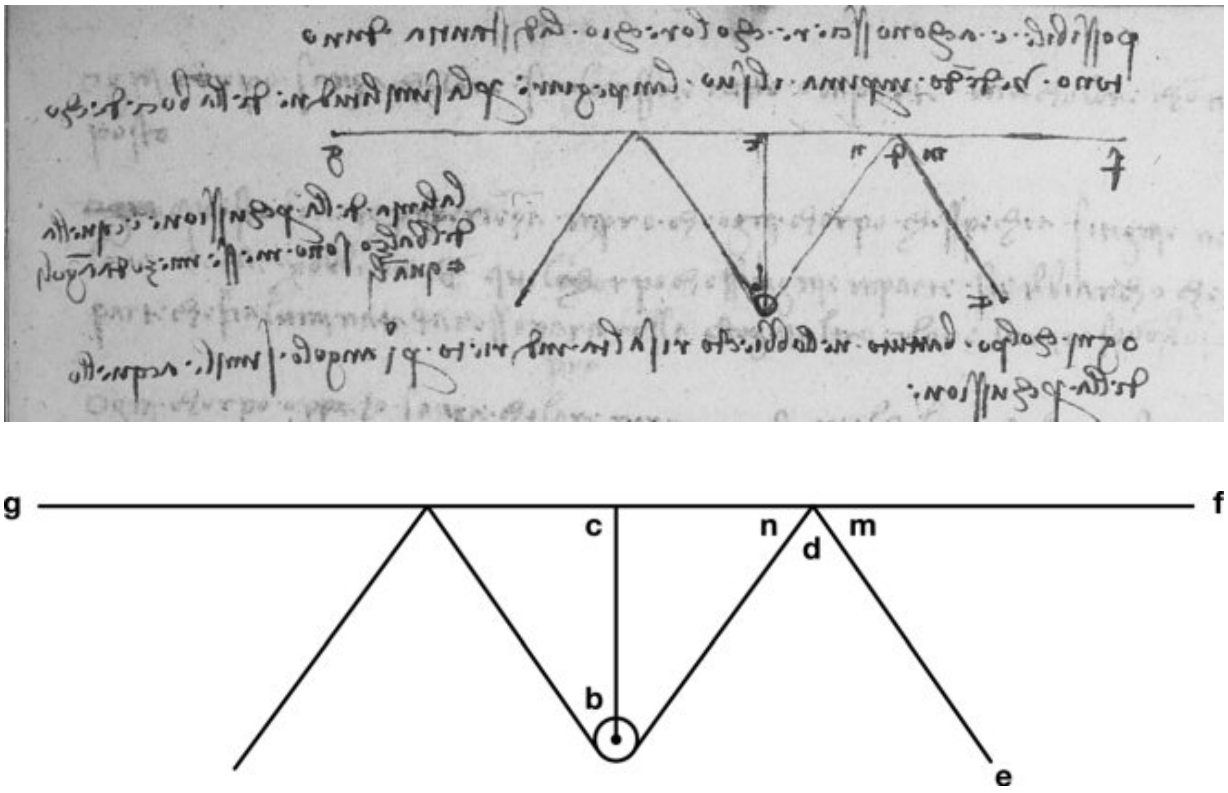


Figura 5-20: *Ilustração da lei de reflexão, Ms. A, fólio 19r; reconstituição de Clagett, 1999.*

Conforme já enfatizei, esse tipo de pensamento sistemático é típico não apenas dos estudos de Leonardo em mecânica, mas também de sua abordagem científica como um todo. Nas páginas anteriores, comentei algumas de suas descobertas e antecipações de princípios abstratos de mecânica que estavam séculos à frente de seu tempo. Incluem a compreensão da relatividade do movimento, a apreensão intuitiva da conservação da energia e a ênfase em princípios de conservação em geral; a antecipação da lei da dissipação da energia (segunda lei da termodinâmica) e a associação de processos irreversíveis com a qualidade física do tempo; a justaposição da interação de gravidade e inércia no movimento do pêndulo com uma interação similar na trajetória de uma pedra arremessada em curva;

os experimentos com o plano inclinado para estudar a aceleração gravitacional e com jatos de água para determinar trajetórias balísticas; a descoberta do princípio hoje conhecido como terceira lei do movimento de Newton e a antecipação intuitiva do princípio de Fermat; por fim, o que não é menos importante, a descoberta do centro de massa do tetraedro com base em argumentos de simetria.

Todos esses exemplos revelam um nível de pensamento abstrato que faz inúmeras declarações científicas de Leonardo parecerem surpreendentemente modernas, a despeito das óbvias raízes aristotélicas de sua ciência. Esse nível de abstração é notório nos “elementos de mecânica” de Leonardo, bem como em outros ramos de sua ciência.

CAPÍTULO 6

O corpo em movimento

Leonardo via o mundo vivo como em fluxo constante, sendo suas formas meras etapas de um processo contínuo de transformação; era, pois, natural para ele entender também o corpo humano em termos de movimento e desenvolvimento. Encarava os movimentos contínuos do corpo – exemplificados na fluência dos gestos, na ondulação dos cabelos ou na flutuação das vestes – como expressões visíveis de graça, que com maestria imortalizava em seus quadros. A *Virgem e o Menino com Santa Ana* (Gravura 5) é talvez a mais cabal demonstração de gestos graciosos reunidos num fluxo único e contínuo.

A associação de graça com movimentos suaves e fluidos era comum entre os artistas da Renascença, mas Leonardo foi o único que tentou compreendê-la cientificamente.[1] Sua mente analítica ficava fascinada pelos movimentos autônomos, voluntários do corpo humano. As investigações deles se tornaram um dos grandes temas de sua obra anatômica. Em incontáveis dissecções e detalhados desenhos anatômicos, Leonardo explorou a transmissão das forças que produzem os diversos movimentos do corpo, de suas origens no centro do cérebro,

passando pela medula espinhal e os nervos motores periféricos, até os músculos, tendões e ossos.

Leonardo percebeu que, nessa propagação das forças motoras, suas origens exatas no cérebro e suas transmissões por meio de impulsos nervosos eram invisíveis e, portanto, inacessíveis à análise científica. Supôs que esses impulsos percorressem os nervos na forma de ondas e chamou seu movimento de “espiritual” – querendo dizer com isso simplesmente que ele era imaterial e invisível.[2] Eis como descreveu as ligações funcionais entre impulsos nervosos, músculos, tendões e ossos:

> O movimento espiritual, fluindo pelos membros dos animais sencientes, alarga seus músculos. Assim alargados, eles se encurtam e repuxam os tendões a que estão presos. Eis a origem da força nos membros humanos (...). O movimento material brota do imaterial.[3]

Em várias etapas de sua pesquisa anatômica, Leonardo examinou todas as seções desse trajeto das forças motoras do corpo. Começou por minuciosas explorações do cérebro, dos nervos cranianos e da medula espinhal,[4] fazendo depois, nos anos 1506-1508, uma série de desenhos anatômicos que são representações conjuntas de diversos sistemas – nervos e músculos, músculos e ossos, ossos e vasos sanguíneos etc. –, bem como imagens do corpo inteiro.[5]

Por essa época, Leonardo já adquirira compreensão suficiente dos princípios da mecânica para explorar em detalhe o modo como os “instrumentos mecânicos” da natureza – músculos, tendões e ossos – trabalham juntos para mover o corpo. Em numerosos desenhos, ele mostrou que as articulações operam como dobradiças, os tendões

como cordas e os ossos como alavancas – por exemplo, em suas primorosas demonstrações dos movimentos complexos do pé (Fig. 4-7), do braço (Gravura 8) e da mão (Fig. 4-2). Aplicou seu conhecimento do movimento de rotação dos eixos ao movimento das juntas articuladas “universais” do quadril e do ombro.[6] Em alguns estudos anatômicos, Leonardo desenhou cordas e arames em vez de músculos para mostrar melhor a direção de suas forças (Figs. 4-2 e 6-9). Também mediu as forças musculares amarrando cordas nas mãos e nos pés de uma pessoa e levantando-a por meio de uma polia com pesos atados às extremidades, mais ou menos como nossos modernos guindastes (Fig. 6-1).

VARIEDADES DOS MOVIMENTOS CORPORAIS

Leonardo utilizou seu conhecimento da mecânica dos movimentos corporais para analisar, nos mínimos detalhes, uma ampla variedade de ações do corpo humano. “Depois de mostrar todas as partes dos membros do homem e de outros animais”, escreveu num lembrete a si mesmo: “representar as operações próprias a esses membros, ou seja, levantar-se da posição deitada; andar, correr, saltar de várias maneiras; erguer e carregar pesos; arremessar coisas a distância; nadar. Assim, em toda ação, demonstrar quais membros e músculos são responsáveis pelas citadas operações.”[7] Como os projetos de pesquisa em outros ramos de sua ciência, o programa de investigação anatômica de Leonardo sobre os movimentos corporais era abrangente e dos mais ambiciosos. Também é notável que, nessa passagem, como em tantas outras, ele considerasse

o corpo humano um corpo animal, tal qual fazemos em biologia hoje.

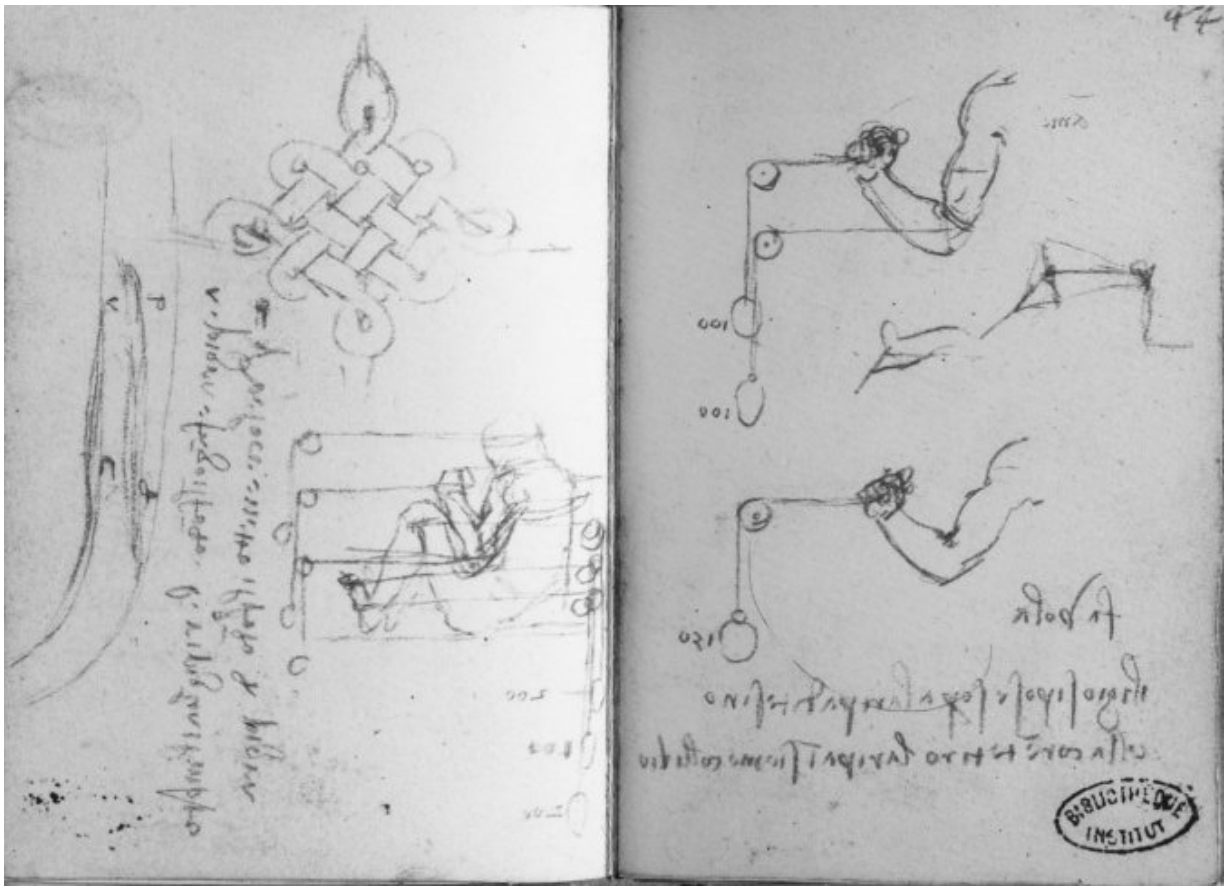


Figura 6-1: *Medidas de forças musculares, Ms. H, fólio 43v (a) e Ms. H, fólio 44r (b).*

Leonardo distinguia três tipos de movimentos corporais. “Os movimentos dos animais são de duas espécies”, explicou, “movimento no espaço (*moto locale*) e movimento de ação (*moto azionale*). O movimento no espaço ocorre quando o animal se desloca de um lugar para outro; o movimento de ação é aquele que o animal executa dentro de si mesmo, sem mudar de lugar (...) e o terceiro é o movimento composto (*moto composto*), que combina ação e locomoção.”[8]

Os movimentos de ação, para Leonardo, incluíam não apenas os movimentos externos do corpo, como empurrar, puxar e erguer, mas também os da fisiologia interna, como respirar e digerir o alimento. Na Coleção Windsor, há vários fólios com desenhos de pequenas figuras nuas executando uma grande variedade de ações (ver Fig. 6-2) e os cadernos de notas também trazem numerosas descrições minuciosas das operações combinadas graças às quais articulações e músculos específicos realizam os movimentos do corpo.[9] Além disso, Leonardo empreendeu estudos cuidadosos das ações do coração, pulmões e outros órgãos internos.[10]

Figura 6-2: *Estudo de figuras em ação, c. 1506-1508, Coleção Windsor, Estudo da figura, perfil e caricatura, RL 12644r.*

Em sua análise de movimentos no espaço, ou locomoção, Leonardo atentou sobretudo para as posições do centro de gravidade do corpo durante as várias fases de um determinado movimento. Observou que “o movimento é criado pela destruição do equilíbrio, isto é, da igualdade [de peso]”;[11] e, ainda, que “a locomoção do homem ou de qualquer outro animal será mais ou menos rápida quanto

mais longe ou mais perto seu centro de gravidade estiver do centro do pé de apoio”.[12] Os cadernos de notas contêm meticulosas descrições de sucessivas mudanças de posição do corpo ao levantar-se do chão, subir uma encosta (ou caminhar contra o vento), descer uma ladeira, correr e saltar.[13]

Figura 6-3: *Estudos da curvatura da coluna vertebral no movimento dos cavalos, dos gatos e dos dragões, c. 1508, Coleção Windsor, cavalos e outros animais, fólio 158.*

Em especial, Leonardo tinha plena consciência dos movimentos ondulatórios da coluna vertebral e do corpo durante a caminhada ou a corrida. Notou o movimento correspondente de subida e descida dos ombros, reconhecendo que essas ondulações são possíveis porque a coluna vertebral se compõe de vários ossos pequenos (as vértebras), articulados numa coluna flexível. Numa folha da Coleção Windsor (Fig. 6-3), a com preensão de Leonardo dos movimentos ondulatórios da coluna vertebral é vi vidamente ilustrada numa série de esboços de cavalos, gatos e dragões. A legenda explica que a “sinuosidade” da coluna vertebral nos movimentos desses animais ocorre tanto longitudinal quanto lateralmente. Durante o mesmo período, Leonardo produziu um magnífico estudo das vértebras e da coluna vertebral (Gravura 6), um de seus desenhos anatômicos mais famosos.

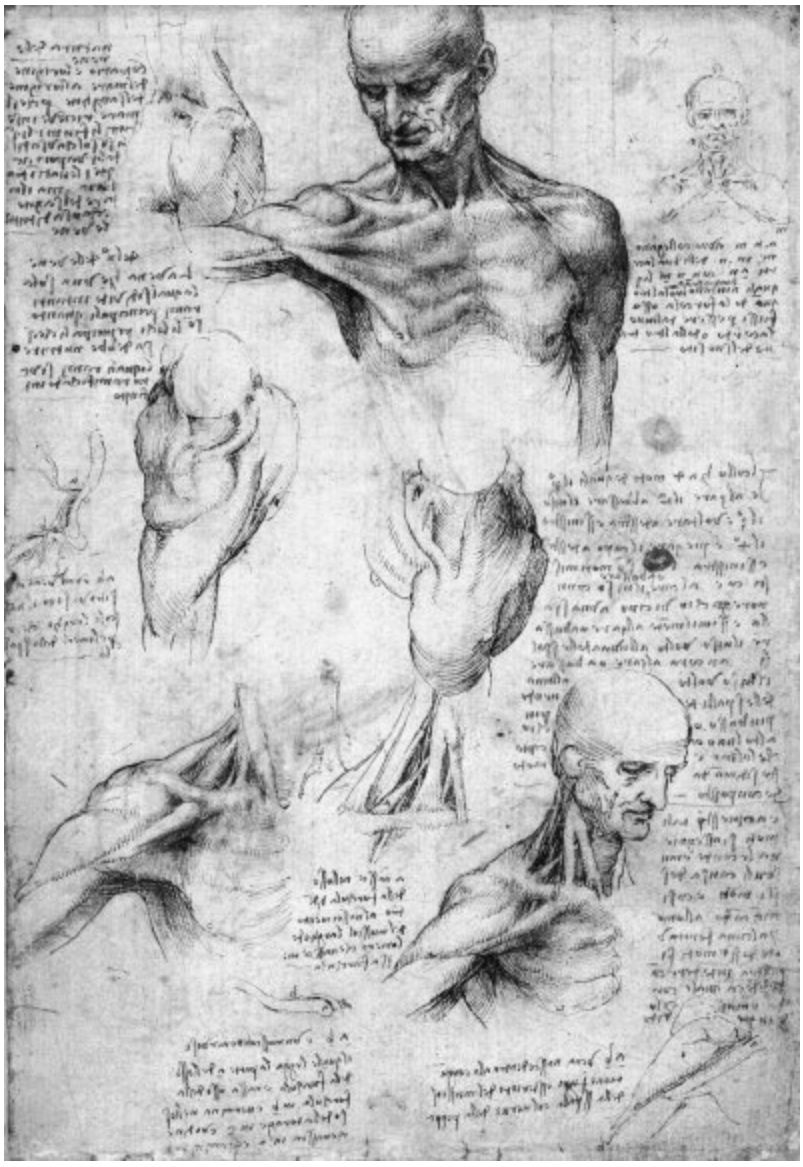


Figura 6-4: *Estudos dos músculos do pescoço e dos ombros, combinando observações externas com dissecções, c. 1509-1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 137r.*

Nas instruções aos pintores sobre como reproduzir figuras humanas, Leonardo enfatizou repetidamente que os gestos e movimentos dessas figuras devem revelar os quadros mentais – pensamentos, intenções, emoções – que os provocaram. “A coisa mais importante que se possa encontrar nos discursos sobre a pintura”, escreveu ele, “são os movimentos condizentes com os estados mentais de

cada criatura viva, como desejo, desdém, raiva, piedade etc.";[14] e aconselhava os pintores a "dar às suas figuras uma atitude reveladora do que elas têm em mente".[15]

Leonardo encarava os movimentos do corpo humano como as expressões visíveis de movimentos mentais (*moti mentali*). Com efeito, pintar as expressões corporais do espírito humano era, para ele, a mais alta aspiração do artista. "É indigna de elogios", declarou, "a figura que não expresse por gestos, tanto quanto possível, a paixão de seu espírito".[16] Essa era uma tarefa em que Leonardo se superava. A *Última Ceia* ficou famosa por toda a Europa imediatamente após sua conclusão, devido não só à novidade da composição, mas também à eloquência e ao vigor dos gestos e expressões faciais dos protagonistas, que exibem um amplo leque de emoções intensas.[17] Do mesmo modo, os quadros do período maduro de Leonardo, inclusive a *Santa Ana* e a *Mona Lisa*, sempre foram considerados obras-primas por causa da expressão da vida interior de suas figuras.

A ANATOMIA NA RENASCENÇA

Quando consideramos a vasta coleção de desenhos anatômicos de Leonardo,[18] ficamos maravilhados com sua grande exatidão e beleza artística, mas não é fácil perceber quão revolucionários eles eram na época. Hoje, estamos acostumados a ver cartazes detalhados de ossos, músculos e nervos em paredes de hospitais e consultórios médicos, sem lembrar que os contemporâneos de Leonardo não dispunham sequer de uma visualização razoavelmente

acurada dos traços anatômicos internos. Mesmo nos melhores manuais de anatomia da época, os órgãos e tecidos internos eram mostrados apenas de maneira esquemática ou simbólica. Leonardo, ao contrário, representava as várias partes do corpo realisticamente, com suas formas corretas e posições relativas mostradas de vários ângulos e no contexto do corpo como um todo. “Minha configuração do corpo humano”, declarou orgulhosamente, “será exibida como se a pessoa tivesse diante de si o homem natural”.[19]

Para bem apreciar o gênio de Leonardo como anatomista precisamos, pois, comparar seus desenhos às ilustrações esquemáticas do tipo encontrado nos textos anatômicos escolásticos que se utilizavam entre a Idade Média e a Renascença. Isso só foi feito recentemente e é um dos novos aspectos de uma reavaliação sistemática da obra anatômica de Leonardo empreendida pelo historiador da ciência Domenico Laurenza.[20] Em seu livro *Leonardo: L’anatomia*, publicado em 2009, Laurenza reconstitui cuidadosamente o modo como Leonardo se movia entre os principais médicos e anatomistas da época, e a forma como estudou os textos clássicos e foi influenciado por suas visualizações anatômicas, que acabou por revolucionar.

A integração de arte e ciência – uma das características definidoras de toda a *oeuvre* de Leonardo – já é notória em seus primeiros estudos de anatomia. Segundo Laurenza, o jovem Leonardo conheceu duas escolas anatômicas diferentes surgidas durante o Renascimento italiano: a “anatomia dos artistas” e a “anatomia dos doutores”. A primeira se concentrava em Florença, a segunda em Milão e

Pavia. Leonardo manteve contato com ambas, foi por ambas influenciado e integrou essas abordagens distintas em sua ciência e em sua arte.

Muitos artistas florentinos, na Renascença, tinham profundo interesse pelo estudo anatômico dos músculos (que às vezes incluía dissecções), a fim de reproduzir os gestos e movimentos do corpo humano – especialmente os de figuras heroicas e vigorosas – de maneira realista e expressiva. Se Michelangelo é tido como o artista mais destacado dessa escola, um de seus antigos representantes, que exerceu grande influência, foi o pintor e escultor Antonio del Pollaiolo, cujos estudos e pinturas de nus musculosos foram amplamente copiados e se tornaram modelos importantes para outros artistas.[21] O ateliê de Pollaiolo não ficava longe da *bottega* de Andrea del Verrocchio, onde Leonardo recebia seu aprendizado,[22] sendo bem possível que o jovem acompanhasse as dissecções realizadas por Pollaiolo.[23]

Estudos da anatomia superficial dos músculos foram também parte integrante do aprendizado de Leonardo. Na *bottega* de Verrocchio, modelos em gesso de membros humanos eram feitos para essa finalidade, lado a lado com a observação direta da musculatura do corpo. Leonardo demonstrou um considerável conhecimento da anatomia superficial dos músculos numa de suas primeiras pinturas, o *São Jerônimo* (*c.* 1480), na qual a dor e o sofrimento do santo asceta são poderosamente expressos na musculatura tensa do pescoço e ombros.[24]

A “anatomia dos artistas” se limitava quase exclusivamente a esses estudos superficiais dos músculos

para a pintura de gestos e movimentos do corpo. A necessidade, para os artistas, de estudos anatômicos já fora enfatizada por Leon Battista Alberti, um “homem universal” e grande ídolo do jovem Leonardo.[25] Em seu livro *De Pictura* (“Sobre a Pintura”), publicado em 1435, Alberti explicou que o movimento corporal resulta das ações combinadas de nervos, músculos, tendões e ossos, encorajando os artistas a estudar todas essas partes anatômicas. Todavia, antes de Leonardo, nenhum artista florentino seguiu as instruções de Alberti: todos limitaram seus estudos, praticamente, ao exame externo de corpos musculosos ou emaciados.

Os contatos de Leonardo com a “anatomia dos doutores” também começaram durante sua juventude em Florença. Aos 20 anos de idade, ele já completara seu aprendizado, sendo reconhecido como mestre pintor e admitido na sociedade dos pintores conhecida como Compagnia di San Luca. Curiosamente, essa sociedade incluía médicos e farmacêuticos, e funcionava no hospital de Santa Maria Nuova. Para Leonardo, foi o início de uma longa ligação com o hospital. Por muitos anos, ele usou a sociedade como um banco para suas economias e, graças a frequentes visitas a Santa Maria Nuova, teve inúmeras oportunidades de conviver com alguns dos principais médicos e anatomistas de Florença.

Era comum, naquele tempo, realizar autópsias para determinar a causa da morte em muitos casos.[26] A cidade de Florença se destacava nessa prática, que ensejava também novos conhecimentos anatômicos, e muitos desses procedimentos *post mortem* eram feitos em Santa Maria Nuova. Leonardo, provavelmente, assistiu a alguns no

hospital e sa - bemos que ele próprio praticou dissecções ali quando estava por volta dos 50 anos.

O envolvimento de Leonardo com a anatomia dos doutores intensificou-se depois de sua mudança para Milão em 1482, quando estava com 30 anos. Na corte dos Sforza, ele deparou com uma cultura que era muito mais intelectual que artística.[27] Estava ligada às grandes universidades do norte da Itália, especialmente a Universidade de Pavia, que abrigava uma das melhores escolas de medicina da época.

Leonardo se adaptou brilhantemente à cultura intelectual de Milão. Logo após sua chegada, iniciou um intenso programa de autoaprendizado que envolvia estudos sistemáticos dos principais campos de conhecimento da época. Contatos com eruditos da Universidade de Pavia desempenharam um papel fundamental nesse empreendimento. Entre eles contavam-se diversos anatomistas e pesquisadores médicos que lhe emprestavam manuais de medicina, forneciam-lhe explicações e ensinavam-lhe a técnica da dissecção.

Em Milão, os estudos anatômicos de Leonardo foram muito além das anatomias superficiais dos artistas, mas ele integraria depois ambas as abordagens, verificando por meio das dissecções aquilo que observava externamente. O resultado foi uma série de desenhos anatômicos “mistos” (por exemplo, Fig. 6-4) que ele chamou de imagens “entre a anatomia e a vida”.[28]

OS TEXTOS MÉDICOS CLÁSSICOS

Durante a Renascença italiana, o ensino médico nas grandes universidades apoiava-se nos textos clássicos de Hipócrates, Galeno e Avicena.[29] Muitos professores interpretavam os clássicos sem questioná-los ou compará-los com a experiência clínica. Os médicos praticantes, por outro lado, muitos deles sem graduação médica, usavam suas próprias combinações ecléticas de terapias, inclusive sangrias e cirurgias, não raro programadas de acordo com o calendário astrológico.

Leonardo estudou em profundidade os textos médicos clássicos, mas diferia cabalmente de seus colegas renascentistas por não aceitar sem crítica os pronunciamentos dessas autoridades. Em seus estudos anatômicos, ele começava geralmente por resumos das lições dos clássicos, muitas vezes transformando descrições escritas confusas em formas visuais bem mais inteligíveis. Em seguida punha à prova os textos clássicos com suas próprias dissecções e, assim fazendo, não hesitava em contestar as autoridades corrigindo-as e acrescentando as novas estruturas anatômicas que havia descoberto.

Os textos médicos estudados por Leonardo incluíam os três clássicos mais populares e mais acessíveis em seu tempo: *De Usu Partium* (“Sobre a Utilidade das Partes”), de Galeno, o *Cânone da Medicina*, de Avicena, e a *Anatomia*, de Mondino.[30] Ele tinha também uma cópia do *Fasciculus Medicinae* (“Coletânea Médica”), a primeira coleção ilustrada de textos médicos que incluía a *Anatomia* de Mondino em sua edição italiana. Além disso, Leonardo pedia emprestados outros textos de medicina e anatomia a

estudiosos de suas relações. Ao todo, menciona cerca de doze obras dessas nos seus cadernos de notas.[31]

Antes da publicação do *Fasciculus Medicinae* em 1491, os textos médicos não eram ilustrados, mas em alguns deles uma gravura separada era inserida ao final do tratado, às vezes de autoria de um leitor sub - sequente do texto. Muitas dessas gravuras médicas ou anatômicas estavam disponíveis também em forma de folheto separado, independente da obra original. Domenico Laurenza reproduz e discute várias dessas antigas ilustrações médicas em seu livro. Uma delas, feita por um artista florentino anônimo nos anos 1470 e inserida ao final de uma cópia manuscrita da *Anatomia* de Mondino, mostra uma figura humana rodeada por linhas de texto (Fig. 6-5). Essa gravura exibe diversos traços típicos das ilustrações médicas da época.

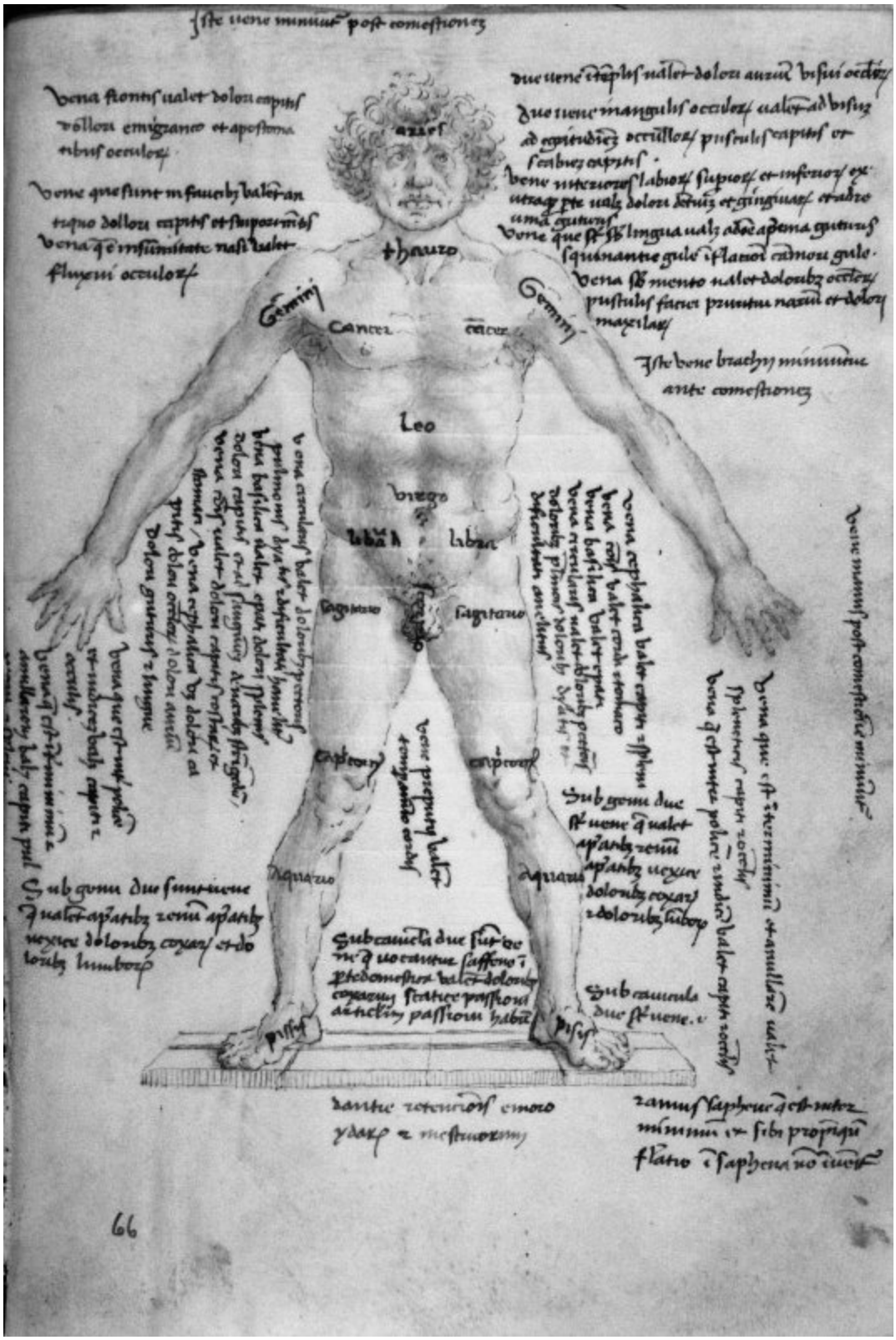


Figura 6-5: *Figura anatômica por artista florentino anônimo, século XV, Biblioteca Nazionale, Florença, Ms. CSP.X.42, fólio 66r.*

O texto discute a prática terapêutica da sangria, frequentemente prescrita por médicos, mas executada por barbeiros. As linhas em torno da figura indicam quais veias devem ser cortadas para doenças específicas. Além disso, várias partes do corpo da figura trazem os nomes dos signos do zodíaco, o que insere os procedimentos cirúrgicos no contexto astrológico.

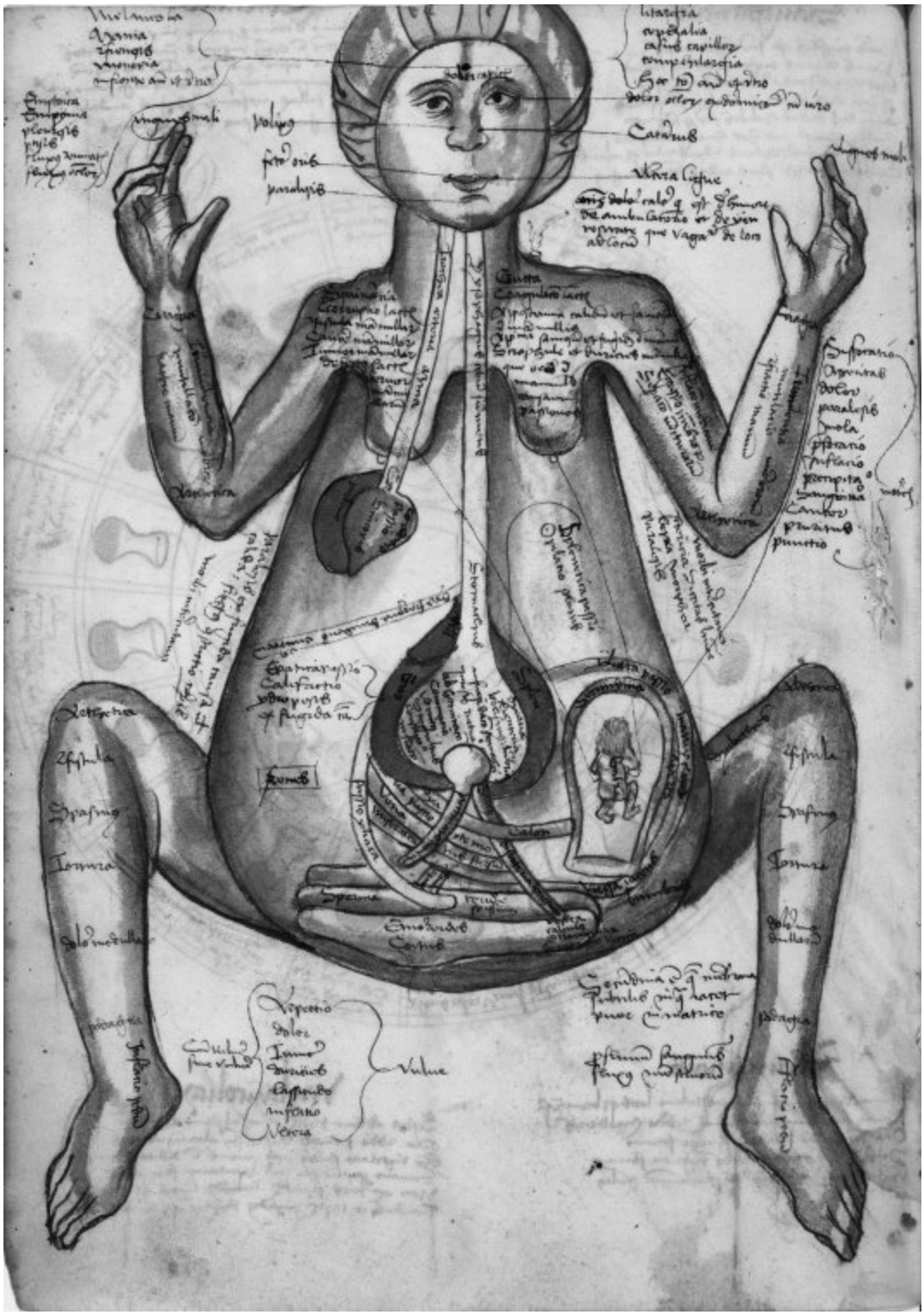


Figura 6-6: *Órgãos anatômicos de uma mulher grávida por ilustrador anônimo, fim do século XV; Biblioteca Apostólica Vaticana, Ms. Pal. Lat. 1325, fólio 349v.*

Pelo modo como as informações estão dispostas em volta da figura ou superpostas a ela, fica claro que o texto é o mais importante. A figura é apenas uma referência esquemática para auxílio da memória. Laurenza salienta ainda que, embora a figura seja reproduzida de maneira realista e não deixe de ter algum mérito artístico, nada acrescenta às informações sobre sangria no texto. Não há representação nenhuma das veias correspondentes às instruções textuais sobre o modo de cortá-las.

Leonardo revolucionou essa relação entre texto e figura dando prioridade à imagem visual em seus desenhos anatômicos. Mesmo um rápido olhar aos fólios anatômicos da Coleção Windsor torna evidente que seu enfoque principal eram as imagens. Os textos que as acompanham são secundários, muitas vezes limitados a títulos explicativos, quando não estão totalmente ausentes. Na verdade, ele achava que suas representações anatômicas visuais eram mais eficientes que quaisquer descrições escritas. Afirmava orgulhosamente que elas transmitiam "o verdadeiro conhecimento de [várias] formas, o que se revelou impossível para escritores tanto antigos quanto modernos (...) sem uma quantidade imensa, tediosa e confusa de palavreado e tempo".[32] Os desenhos anatômicos de Leonardo eram tão radicais na concepção que permaneceram inigualados até o fim do século XVIII, cerca de trezentos anos depois.

Uma gravura dos órgãos de uma mulher grávida, feita por um ilustrador anônimo ao final do século XV (Fig. 6-6), oferece outra oportunidade instrutiva para esclarecer as gritantes diferenças dos desenhos anatômicos de Leonardo.

De novo, o texto invade a figura, cujos traços anatômicos esquemáticos não podem ser entendidos sem os títulos explicativos a eles superpostos. O contraste com a famosa representação que Leonardo executou do mesmo tema (Fig. 4-6), mais ou menos na mesma época, é impressionante. Também é impressionante a comparação da representação simbólica do feto na Fig. 6-6 com os desenhos delicados e totalmente realistas em que Leonardo mostra o feto humano no ventre materno (Gravura 10).

Alguns anos após o aparecimento da edição latina do *Fasciculus Medicinae*, uma edição italiana foi impressa em Veneza com algumas modificações significativas nas ilustrações. As figuras eram muito mais realistas e os textos já não as invadiam. “Tudo isso parece apontar na direção tomada por Leonardo”, observa Laurenza, “exceto pelo fato fundamental de ele continuar trabalhando dentro da cultura manuscrita, inovando-a mas permanecendo seu prisioneiro, enquanto os [editores do *Fasciculus*] já operavam num mundo novo: o da cultura tipográfica”.[33]

Leonardo tinha plena consciência das grandes vantagens da imagem impressa para a reprodução exata e a disseminação rápida, e durante toda a sua vida sempre se interessou pelos detalhes técnicos dessa prática.[34] Planejou a impressão de seus tratados e insistiu em que para os desenhos anatômicos fossem usadas chapas de cobre, mais caras que a xilogravura, mas muito mais eficientes em se tratando de reproduzir os finos detalhes de sua obra. “Peço a quem vier depois de mim”, escreveu na folha onde se veem os magníficos desenhos da coluna vertebral, “não permitir que a avareza o constranja a fazer as impressões

em [madeira]”.[35] Porém, a impressão de seus desenhos anatômicos mais primorosos – com sombreamentos ultrafinos e, em alguns casos, com acréscimos de aquarela – exigiria técnicas altamente sofisticadas de gravação e outros recursos inovadores que não existiam na época.[36]

DESENHOS ANATÔMICOS E DISSECÇÕES

A inversão da relação entre texto e figura não foi o único aspecto revolucionário nos desenhos anatômicos de Leonardo. A fim de apresentar os traços do corpo humano de forma exata e realista – “como se a pessoa tivesse diante de si o homem natural”[37] –, ele introduziu numerosas inovações: as estruturas anatômicas mostradas de diferentes perspectivas; sua apresentação por meio de “vista em destaque” a fim de ilustrar como as partes de um conjunto (por exemplo, as vértebras da coluna) se encaixam umas nas outras; os músculos vistos em camadas sucessivas para indicar a profundidade de um órgão ou traço anatômico etc. Nenhum de seus predecessores ou contemporâneos sequer se aproximou dele em tamanha minúcia, exatidão e sofisticação. Quando desenhava músculos, tendões e ossos, o principal intento de Leonardo era sempre mostrar como eles trabalham conjuntamente nos movimentos e atividades do corpo todo. Para tanto, era de importância capital para ele demonstrar as relações tridimensionais entre várias estruturas; assim, mostrou-as repetidamente a partir de diferentes perspectivas.

“Se quisermos conhecer a fundo as partes anatômicas do homem”, explicou, “teremos de virá-lo ou mover nossos

olhos a fim de examiná-lo de diferentes ângulos: de baixo, de cima e dos lados. Virando-o, investigaremos a origem de cada parte e, por esse método, nosso conhecimento da anatomia natural será satisfeito".[38]

Esse trecho é parte de uma longa sequência de parágrafos nos quais Leonardo traça planos ambiciosos para sua grande obra, *De Figura Umana* ("Sobre a Figura Humana").[39] Tendo explicado a necessidade de apresentar estruturas anatômicas de vários pontos de vista, ele passa a descrever como irá fazer isso para cada parte em separado:

> Assim, graças a meu plano, ireis conhecer cada parte e cada todo por meio da demonstração de três aspectos diferentes de cada parte. Pois, vista cada parte de frente, com alguns nervos, tendões e veias que nascem do lado que estivestes observando, a mesma parte será mostrada de flanco ou de trás, tal como se a mantivésseis na mão e a virásseis de um lado para o outro até obter pleno conhecimento daquilo que queríeis conhecer.[40]

Não sabemos quanto desse programa ambicioso Leonardo conseguiu realizar. Mas, entre os duzentos fólios de desenhos anatômicos que chegaram até nós, há muitos nos quais ele demonstra sua técnica de exibir estruturas anatômicas de diferentes perspectivas (por exemplo, Figs. 6-7, 6-9 e 6-10; Gravura 6). Às vezes, essas diferentes perspectivas formam uma sequência tão coesa que sugerem um movimento contínuo, como as imagens cinematográficas (por exemplo, Gravura 7).

Os sofisticados desenhos anatômicos de Leonardo se baseavam num grande número de dissecções de corpos humanos e animais, que ele fazia com o máximo cuidado e atenção ao detalhe, "retirando a carne em partículas minúsculas" para expor vasos sanguíneos, músculos ou ossos até que o adiantado estado de decomposição o

impedisse de ir mais longe. “Um único corpo não bastava por muito tempo”, explicou ele, “devendo eu avançar aos poucos com o número de corpos que pudesse me proporcionar um conhecimento completo”.[41] Mas mesmo esse processo longo e difícil não era suficiente para satisfazer aos elevados padrões científicos de Leonardo. “Repeti-o duas vezes para perceber as diferenças”, diz-nos ele laconicamente.

Na mesma página, Leonardo nos faz um vívido relato das péssimas condições em que tinha de trabalhar. Como não existissem produtos químicos para conservar os cadáveres, estes começavam a se decompor antes que ele tivesse tempo de examiná-los e desenhá-los adequadamente. Para evitar acusações de heresia, trabalhava muitas vezes à noite, iluminando a sala de dissecção com velas, o que deve ter tornado essas experiências ainda mais macabras. “Talvez sejas impedido de fazê-lo por teu estômago”, escreve ele, dirigindo-se a um aprendiz imaginário, “e, se não for o estômago, será talvez o medo de passar a noite na companhia desses corpos esquartejados, esfolados e horríveis de se ver”.

O desejo apaixonado de conhecimento científico é que deu a Leonardo a força de que precisava para superar sua própria aversão. Essa luta emocional lembra de perto uma passagem célebre que ele escreveu quando estava por volta dos 20 anos. É um dos poucos trechos dos cadernos de notas em que revela suas emoções; a linguagem poética e a natureza simbólica do texto induziram mesmo alguns autores a especular que talvez se refira a uma recordação ou sonho de infância:

> Impelido por um desejo ardente, ávido por contemplar a abundante variedade de formas estranhas criadas pela natureza artística, e tendo perambulado durante algum tempo em meio aos rochedos escuros, cheguei à entrada de uma grande caverna, onde permaneci por um momento, estupefato diante daquele sítio desconhecido. Curvei-me, pousei a mão esquerda no joelho e, com a direita em pala sobre o cenho franzido, balancei várias vezes de um lado para o outro na tentativa de discernir alguma coisa lá dentro. Mas a pesada escuridão que lá reinava impediu-me disso. Após certo tempo, dois sentimentos se manifestaram subitamente em mim, medo e desejo: medo da ameaçadora caverna sombria e desejo de saber se havia dentro dela alguma coisa miraculosa.[42]

As dissecções anatômicas de Leonardo também eram motivadas por um desejo irrefreável. Superando sua repugnância natural, ele frequentava assiduamente a caverna tenebrosa da sala de dissecção e de lá saía com muitas "coisas miraculosas" que para sempre estabeleceriam sua reputação de o maior anatomista da época.

A despeito das desagradáveis condições sob as quais tinha de trabalhar, Leonardo nunca perdeu de vista a dignidade humana dos corpos que dissecava. Vê-se isso pelo famoso relatório sobre a morte, em sua presença, de um homem que conheceu durante uma visita ao hospital de Santa Maria Nuova:

> Aquele ancião, poucas horas antes de falecer, informou-me que tinha mais de 100 anos e que, afora a fraqueza, não sentia nenhum incômodo físico. E assim, sentado numa cama do hospital de Santa Maria Nuova, em Florença, sem fazer um movimento ou dar qualquer sinal de desconforto, foi-se desta vida. Realizei nele uma anatomia para descobrir a causa daquela morte tão doce.[43]

O exame *post mortem* do "centenário" tornou-se um marco em sua obra e levou-o a uma das descobertas médicas mais importantes que fez ao longo da carreira.[44] Ao

mesmo tempo, a história é um testemunho comovente da profunda humanidade de um grande cientista.

Na minuciosa passagem em que descreve suas técnicas de dissecção, Leonardo declara ter dissecado “mais de dez corpos humanos”; e, quando morava em Amboise, já na velhice, contou a um visitante que realizara anatomias “em mais de trinta cadáveres de homens e mulheres de todas as idades”.[45] Além disso, dissecou numerosos corpos de animais, bem menos difíceis de obter, e transferiu o que aprendera com esses exames para o corpo humano. Domenico Laurenza assinala que as “representações anatômicas híbridas” resultantes são muitas vezes vistas pelos estudiosos como imprecisões e indícios de imaturidade, mas que uma interpretação diferente também pode ser aventada:

> Essas representações certamente refletem as dificuldades, naqueles tempos recuados, de realizar dissecções humanas. No entanto, Leonardo não esconde a origem animal de suas noções (...) enfatizando assim os aspectos animais da anatomia humana.[46]

O que, por fim, se depreende desses desenvolvimentos conceituais é a constatação segura e exata, por parte de Leonardo, de que o corpo humano é um corpo animal.

O vasto acervo de seus estudos anatômicos foi analisado nos mínimos detalhes por vários especialistas em história médica. Além da reconstituição e reavaliação de Domenico Laurenza, bem recente, minhas principais fontes foram duas obras fundamentais: *Leonardo da Vinci’s Elements of the Science of Man*, de Kenneth Keele, e *Leonardo da Vinci on the Human Body*, de C. D. O’Malley e J. B. Saunders.[47] Nas páginas que se seguem, só poderei

passar em revista as realizações mais destacadas de Leonardo em anatomia.

OSSOS E ARTICULAÇÕES

O esqueleto humano era, naturalmente, mais fácil de examinar que os tecidos e órgãos internos do corpo, pois estes perdiam a forma e a estrutura logo depois de sua dissecção. As imagens de ossos e articulações estão entre os desenhos anatômicos mais exatos, primorosos e belos de Leonardo. Com efeito, Kenneth Keele os considera verdadeiramente extraordinários, mesmo quando comparados com as representações anatômicas atuais:

> De todas as realizações de Leonardo, os desenhos do esqueleto e dos músculos humanos talvez devam ser reconhecidos como os mais notáveis. Esse aspecto de seu exame do corpo humano, suplementado por uma capacidade inigualável de apresentar movimentos em forma de perspectiva visual, dão a seus desenhos de ossos uma vida raramente captada pela moderna ilustração anatômica.[48]

Um magnífico fólio da Coleção Windsor (Fig. 6-7) mostra a tentativa mais bem-sucedida que Leonardo empreendeu de desenhar um esqueleto completo. Num grupo de seis esboços, diversos conjuntos de ossos e articulações são mostrados de trás, de frente e de lado. A pelve aparece pela primeira vez em sua forma e localização exatas, no ângulo certo com relação à coluna vertebral e aos fêmures. O tórax, a coluna lombar e as articulações do joelho também são notavelmente exatos. Segundo Keele, “Esses desenhos revelam um conhecimento profundo da estática [e] da transmissão de peso na postura humana ereta”.[49]

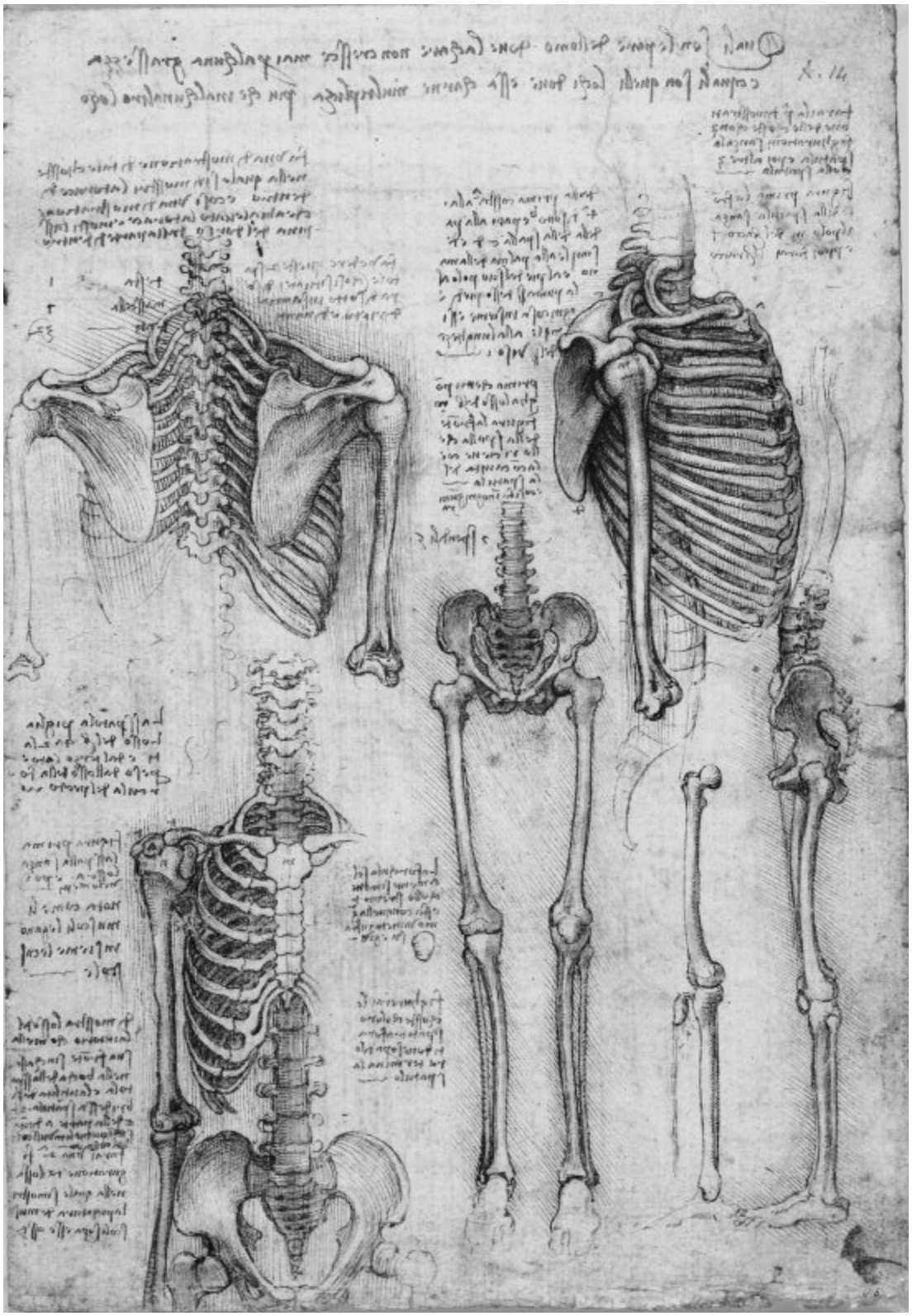


Figura 6-7: *O esqueleto humano, c. 1509-1510; Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 142r.*

Depois de demonstrar como as diversas partes do esqueleto se encaixam, Leonardo passa a estudá-las separadamente e aos pares em vários outros fólios. Estes incluem estudos da coluna vertebral, da pelve e das pernas, dos braços e das mãos, e também das articulações do cotovelo, do joelho e do tornozelo.[50] Todos esses estudos mostram os ossos e articulações principais de vários ângulos (de frente, de lado e de trás) e em diversas posições: cotovelos se dobrando e se estendendo, antebraços girando, pernas nas posturas de pé e ajoelhada – todos são análises precisas da mecânica dos movimentos corporais.

No conhecido fólio de estudos da coluna vertebral (Gravura 6), Leonardo demonstra com maravilhosa exatidão como as vértebras da coluna se conectam para formar uma coluna flexível. O primeiro esboço à direita (de onde Leonardo, que escrevia e desenhava da direita para a esquerda, geralmente inicia a página) mostra a coluna vertebral inteira de frente. As vértebras (cervicais, torácicas, lombares, sacrais e coccígeas na moderna terminologia médica), 31 ao todo e agrupadas em cinco conjuntos, estão claramente identificadas por letras e, no texto, aparecem enumeradas corretamente numa pequena tabela. Além disso, Leonardo assinala com precisão de onde se projetam, da medula espinhal, os nervos que se ramificam para os braços e pernas.

O segundo desenho apresenta uma visão de lado da coluna vertebral, com a curvatura da coluna vertebral representada corretamente – uma façanha jamais igualada por qualquer dos outros anatomistas do Renascimento. Ao

pé da página, a coluna vertebral é mostrada por trás e, à sua esquerda, as sete vértebras cervicais aparecem com tamanha precisão que podem ser facilmente identificadas por um médico moderno. Além disso, Leonardo desenha as três primeiras vértebras cervicais numa “vista em destaque” na qual os complicados mecanismos de encaixe das articulações, assinalados por letras, são prontamente reconhecíveis.

Esses desenhos não apenas representam um tremendo feito científico como são obras-primas artísticas. A execução precisa de Leonardo se combina com seu domínio da perspectiva e dos jogos de luz e sombra para transmitir uma sensação de complexidade, elegância e beleza inigualadas nas ilustrações científicas da época ou contemporâneas. Não é de estranhar então que ele se permitisse um raro assomo de orgulho ao pé da página, onde declara que essas representações das vértebras “darão o verdadeiro conhecimento de suas formas, conhecimento que nem os escritores antigos nem os modernos foram capazes de dar sem uma quantidade imensa, tediosa e confusa de palavreado e tempo”.

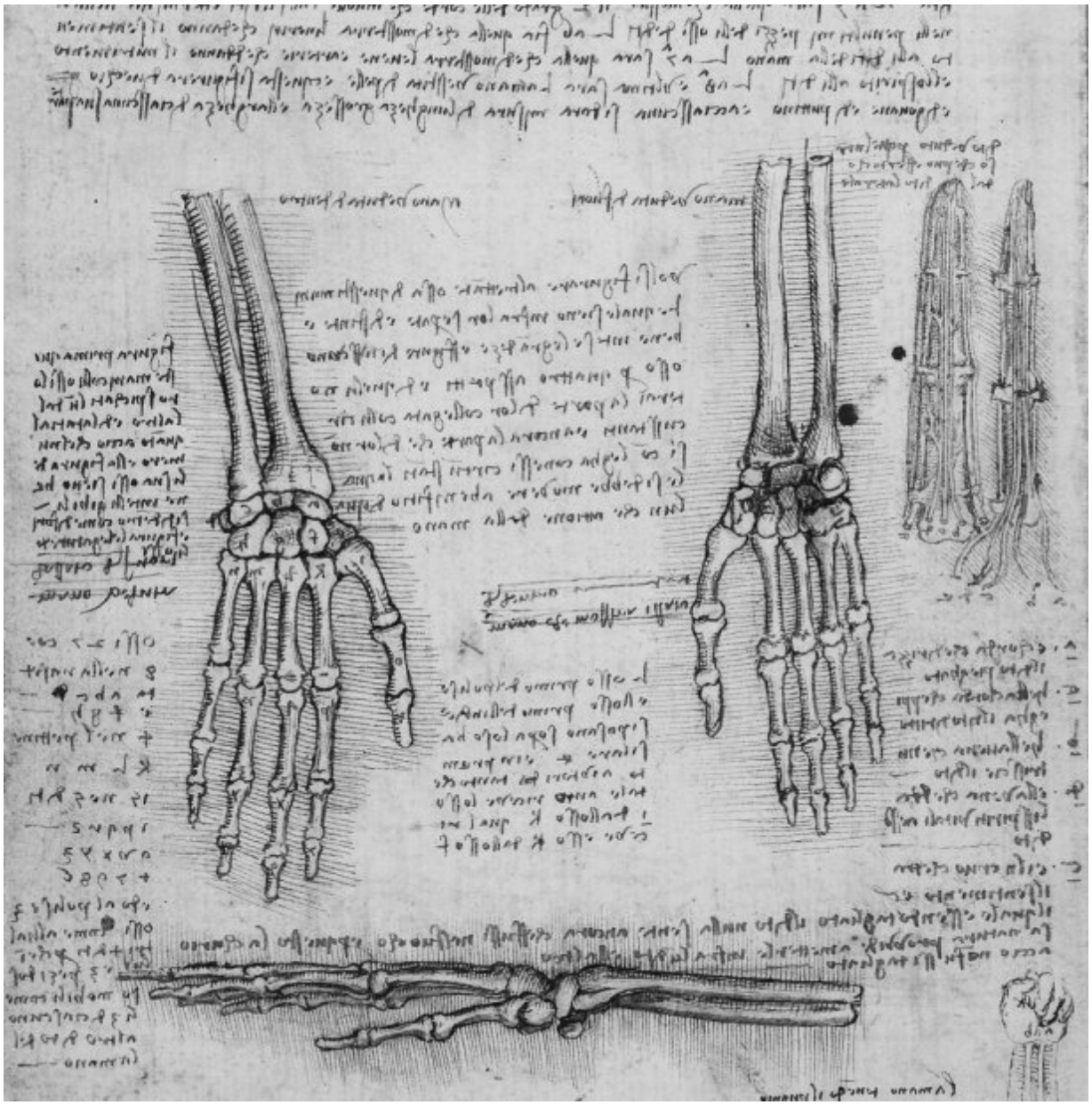


Figura 6-8: *Estudos dos ossos da mão, c. 1509-1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 143v.*

Em outro belo conjunto de desenhos, Leonardo apresenta seus estudos dos ossos da mão (Fig. 6-8), empregando delicados sombreamentos, dois tons de castanho e uma demão de giz preto. Esses estudos foram os primeiros a mostrar – de frente, de trás e de ambos os lados – os ossos do pulso e da mão de maneira exata. Todos os

ossos são claramente rotulados e enumerados na legenda. Em dois esboços na margem direita, os ossos dos dedos surgem cobertos por tendões flexores e extensores, artérias, veias e nervos – todos classificados por letras e identificados no texto embaixo. O parágrafo ao pé da página é reservado à descrição dos movimentos da mão na altura do pulso.

O texto no alto da página deixa claro que, para Leonardo, esse conjunto de estudos seria apenas o primeiro de uma série de oito demonstrações sistemáticas da mão:

> A primeira demonstração da mão será unicamente dos ossos. A segunda, dos ligamentos e das várias cadeias de tendões que os mantêm unidos. A terceira, dos músculos que se projetam desses ossos. [A quarta e a quinta], das (...) cordas que movem todos os dedos (...). A sexta, dos nervos que dão sensação aos dedos. A sétima, das veias e artérias que fornecem nutrição e espírito [vital] aos dedos. A oitava e última, da mão recoberta pela pele, ilustrada pelos casos de um homem idoso, um jovem e uma criança.[51]

Em outro fólio, ele planeja um conjunto ainda mais vasto de quarenta demonstrações da mão, concluindo sua longa descrição com estas ambiciosas palavras:

> E assim, no capítulo da mão, daremos quarenta demonstrações; o mesmo sucederá para cada membro. Então, chegaremos ao conhecimento pleno.[52]

Não sabemos quanto desse projeto grandioso Leonardo conseguiu executar, pois muitos de seus desenhos anatômicos se perderam. A Coleção Windsor contém mais alguns estudos detalhados da mão e outros do pé, de novo com todos os seus ossos enumerados e mostrados em suas perfeitas formas anatômicas.[53] No entanto, o próprio Leonardo reconheceu a impossibilidade de completar seus estudos anatômicos da maneira sistemática que planejara.

“Nisso não fui impedido”, revela melancolicamente, “nem pela avareza nem pela negligência, apenas pelo tempo”.[54]

MÚSCULOS E TENDÕES

No esquema que Leonardo elaborou de demonstrações anatômicas sistemáticas “a partir de dentro”,[55] os músculos e os tendões são vistos no segundo e terceiro conjunto de dissecções, depois dos ossos. Seu objetivo, com isso, sempre foi entender de que modo músculos, tendões e ossos trabalham harmonicamente para produzir os movimentos do corpo. Conforme salienta Kenneth Keele: “Leonardo dissecava, por assim dizer, antes os movimentos do corpo humano do que cadáveres imóveis.”[56]

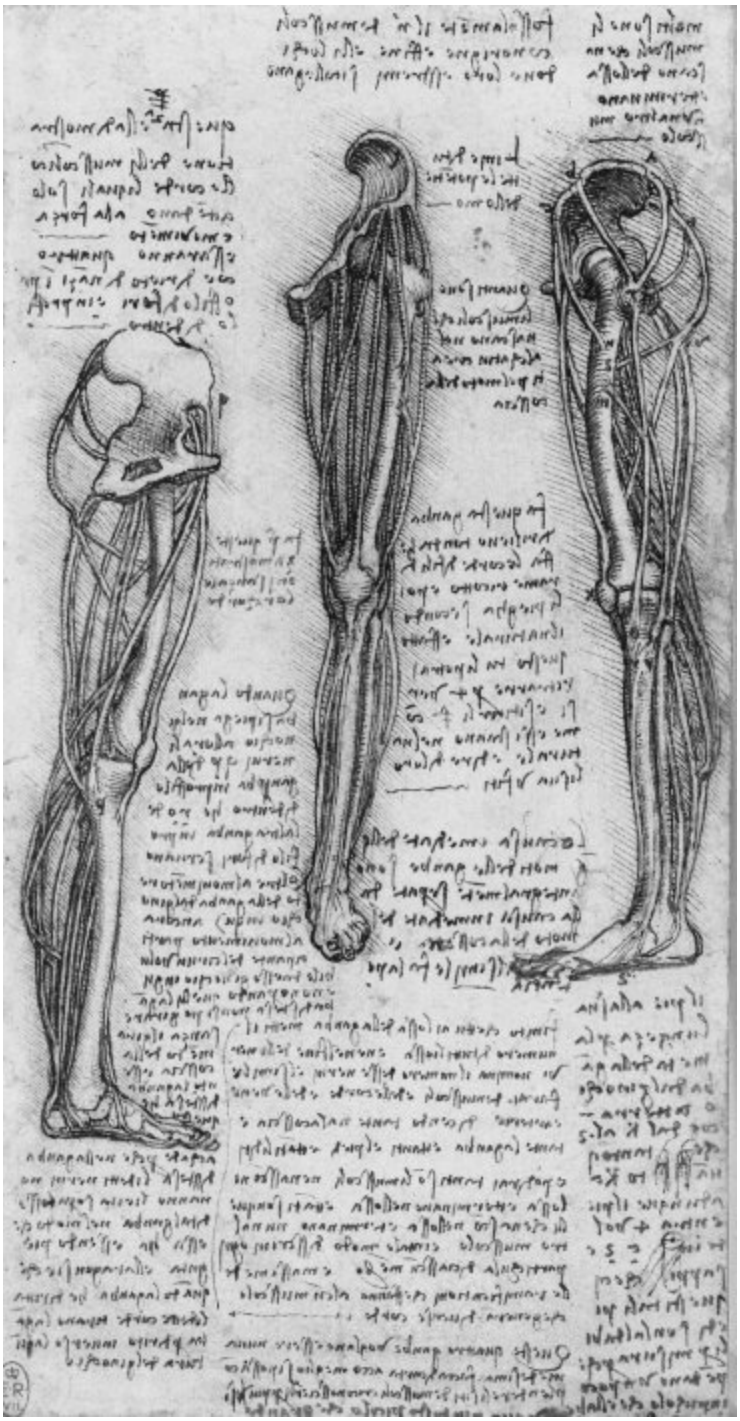


Figura 6-9: *Diagrama esquemático dos músculos da perna, c. 1509-1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 152r.*

“Seis são as coisas que se conjugam para compor os movimentos”, explica Leonardo em seus Estudos Anatômicos, “a saber, osso, cartilagem, membrana, tendão,

músculo e nervo".[57] Em outra página próxima, ele descreve em maiores detalhes a natureza e as funções dessa sequência de estruturas anatômicas:

> Os tendões são instrumentos mecânicos (...) que fazem o trabalho a eles confiado [pelos músculos]. As membranas são contíguas à carne, ficando entre esta e o nervo (...). Os ligamentos se prendem aos tendões e constituem uma espécie de membrana que une as articulações dos ossos, convertendo-se em cartilagem. São tão numerosos, em cada articulação, quanto os tendões que movem essa articulação e quanto os tendões opostos que chegam até ela. Tais ligamentos estão todos conectados e misturados para ajudar, fortalecer e equilibrar-se uns aos outros.[58]

Essas descrições são notavelmente exatas. Os termos usados por Leonardo ainda integram a terminologia da ciência médica contemporânea.[59]

Está implícito, nas duas últimas frases da descrição de Leonardo, o reconhecimento de que existem pares de músculos antagônicos cuja função é manter o corpo em equilíbrio. Em outro fólio, ele descreve esses "pares de músculos em oposição" mais detalhadamente e discute sua importância para a manutenção da postura do corpo.[60] O historiador da medicina Sherwin Nuland notou que a ação de grupos de músculos que trabalham em reciprocidade com grupos antagônicos só foi reconhecida no início do século XX.[61]

No longo trecho em que estabelece planos para uma série de dissecções, Leonardo fala também sobre as tremendas dificuldades encontradas para dissecar os tecidos macios do corpo. Enfatiza "a enorme confusão que resulta da mistura de membranas com veias, artérias, nervos, tendões, músculos, ossos e sangue, que dá a tudo a mesma cor; os vasos já sem seu sangue não são

reconhecíveis porque diminuem de tamanho; e a integridade das membranas é rompida quando buscamos as partes encerradas dentro delas (...)".[62] Em vista da delicada e efêmera natureza desses tecidos, por falta de conservantes, são ainda mais notáveis a clareza e a exatidão da maioria dos desenhos anatômicos de Leonardo.

A fim de provar que músculos e tendões são "instrumentos me - cânicos", Leonardo desenvolveu um método eficiente de converter padrões musculares complexos em diagramas geométricos simplificados.[63] Para começar, ele identifica a "linha central" de ação (conhecida hoje como "linha de tração") para músculos de várias formas. Em seguida, introduz uma inovação técnica das mais engenhosas: "Mostremos os músculos finos como fileiras de cordas", explica ele no fólio que mostra os músculos anteriores da perna. "Assim, conseguiremos representar um em cima do outro, da maneira como a natureza os dispôs; e assim os nomearemos de acordo com a parte que servem (...). Após essa demonstração, desenharemos ao lado a verdadeira forma, tamanho e posição de cada músculo".[64]

Ele insiste em que é preciso desenhar cordas e não apenas linhas. "Depois de desenhar os ossos da mão, se quisermos desenhar também os músculos que estão ligados a eles, façamos cordas e não músculos. Digo cordas e não linhas para que se saiba qual músculo fica em cima ou embaixo de outro, coisa que simples linhas não conseguem representar".[65] Essa nota aparece no fólio onde se acham os estudos dos me canismos da mão (Fig. 4-2), que ilustram a

mencionada técnica. Vemos claramente a passagem dos cinco tendões flexores sob o ligamento carpal transverso.

Finalmente, depois de substituir músculos e tendões por cordas em alguns de seus desenhos, Leonardo se propõe construir um modelo físico dos diagramas resultantes das forças musculares. Ilustra o último passo dessa técnica com os músculos da perna: “Façamos a perna em relevo arredondado total [isto é, como uma estátua] e as cordas de fios de cobre temperado, curvando-os depois segundo sua forma natural. Poderemos então desenhá-los dos quatro lados, instalá-los tais quais existem na natureza e discorrer sobre suas funções.”[66] No fólio que contém essas instruções (Fig. 6-9), o diagrama esquemático resultante dos músculos da perna é mostrado de três lados.

Os historiadores da medicina O’Malley e Saunders identificaram vários músculos da perna nesses diagramas esquemáticos, mas observam que eles contêm algumas imprecisões.[67] Não obstante, a abordagem geral de Leonardo à análise mecânica de padrões musculares complexos revela um nível sem precedentes de raciocínio científico e matemático.

Ao estudar o sistema muscular humano, Leonardo investiu seus maiores esforços nos músculos do ombro e do braço, do braço e da mão, e da perna e do pé. Essas são também as áreas da miologia (estudo dos músculos) em que produziu suas mais belas ilustrações. A Coleção Windsor abriga cerca de dez fólios com estudos da região do ombro, entre eles as famosas visões sequenciais dos músculos do ombro e do braço (Gravura 7). Esse fólio é precedido, na Coleção Windsor, por outro que mostra mais

quatro visões sequenciais.[68] Os dois fólios, juntos, apresentam uma série contínua em que o corpo é girado 180 graus, da frente para as costas (quando visto da direita para a esquerda, na direção da escrita e do desenho de Leonardo). O resultado é quase uma sequência cinematográfica da ação do músculo durante a rotação do ombro. Vários músculos são classificados por letras nos desenhos e descritos nas legendas, mas um anatomista moderno pode identificar facilmente mesmo os não classificados, devido à sua perfeita representação.[69]

De um ponto de vista científico, os estudos de Leonardo das estruturas profundas do ombro são talvez ainda mais notáveis. Para os quatro desenhos mostrados na Fig. 6-10, por exemplo, ele empregou várias de suas técnicas gráficas inovadoras. No desenho do alto, os músculos deltoide e trapézio são erguidos para expor as estruturas profundas subjacentes da articulação do ombro, todas tão bem executadas que é muito fácil identificá-las.[70] No desenho da esquerda, a clavícula é vista em destaque para mostrar que forma uma articulação com parte da escápula. No desenho ao pé da página, todos os músculos foram seccionados para que as estruturas profundas aparecessem claramente. Enfim, o desenho do meio, à direita, é um diagrama esquemático dos músculos do ombro que mostra suas linhas de tração.

Graças ao uso habilidoso dessas técnicas gráficas, Leonardo consegue mostrar, com impressionante clareza, as extensões espaciais e as relações funcionais mútuas das complexas estruturas anatômicas do ombro. As linhas de força, as partes classificadas com letras e outras partes

ligadas por diretrizes fazem com que esses desenhos quase se pareçam com diagramas matemáticos – representações geométricas de relações anatômicas funcionais.

Um dos estudos mais primorosos de Leonardo, executado no mesmo estilo sutil de seus estudos dos ossos da mão (Fig. 6-8), é uma imagem da rotação do braço (Gravura 8). O principal objetivo dessa série de cinco desenhos é demonstrar os mecanismos pelos quais a palma da mão se vira para cima e para baixo, “em direção ao céu” e “em direção à terra”, como escreveu Leonardo. É uma de suas muitas pesquisas sobre o modo como os movimentos do corpo são gerados pela ação dos músculos e tendões.

O desenho do alto mostra um braço estendido com os comprimentos dos ossos na proporção correta. O bíceps, principal objeto desse estudo, aparece com as duas cabeças se juntando a meio caminho do úmero (o osso do braço propriamente dito). O músculo é visto sem seu tendão, mas o ponto de inserção deste no rádio (o menor dos dois ossos do antebraço), logo abaixo do cotovelo, é claramente mostrado como uma leve protuberância. O segundo desenho apresenta uma vista em destaque na qual a forma da articulação do ombro e o encaixe dos ossos que formam a articulação do cotovelo são mostrados com a maior precisão.

Leonardo descobriu que o bíceps não apenas curva o cotovelo, mas ajuda a virar a palma para cima girando a extremidade do rádio. Isso é demonstrado no terceiro desenho. Os dois ligamentos desse músculo são vistos mais uma vez em sua origem, cortados no ponto “b” (“d” na escrita especular de Leonardo), pouco antes de se juntar ao

tendão. A inserção deste no rádio aparece novamente, classificada pela letra “a” (“∧”). Nessa posição, conhecida como supinação pelos modernos anatomistas, os dois ossos do antebraço, rádio e cúbito, ficam paralelos.

Quando a palma se vira para baixo na posição conhecida como pronação, o rádio, girando, cruza o cúbito. Isso está bem claro no quarto desenho. Devido ao cruzamento dos dois ossos, o antebraço se encurta ligeiramente, como Leonardo explica muito bem no texto a seguir:

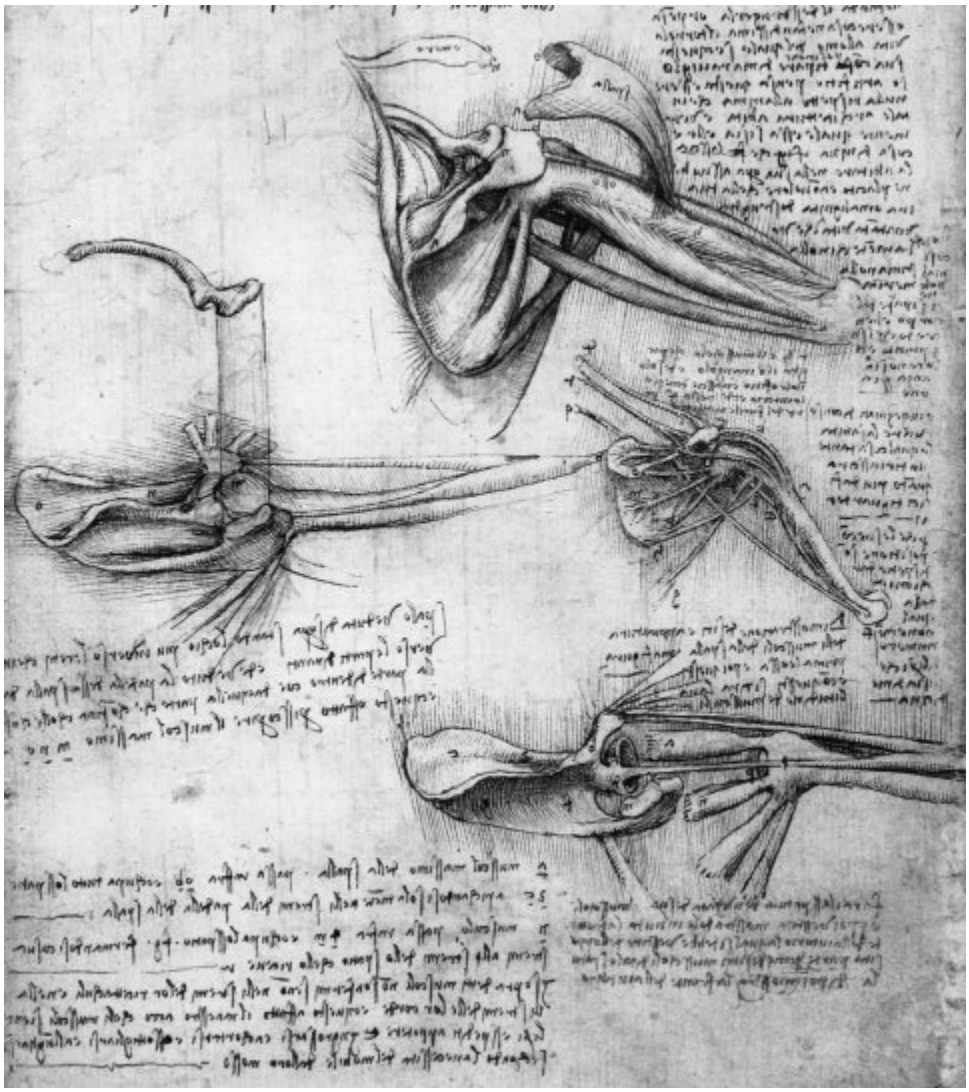


Figura 6-10: *Estruturas profundas do ombro, c. 1509-1510, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 136r.*

> O braço, com dois ossos interpostos entre a mão e o cotovelo, ficará um pouco mais curto caso a palma da mão se volte para a terra e não para o céu, estando o homem de pé com o braço estendido. Isso acontece porque os dois ossos, forçando a palma da mão para a terra, se cruzam.[71]

No último desenho do estudo, Leonardo analisa os músculos responsáveis pela pronação. O bíceps agora aparece junto com seu tendão, vendo-se também o chamado músculo pronador, que gira o rádio na direção oposta ao bíceps. O pronador é mostrado em detalhes precisos, originando-se na ponta do úmero (na frente do desenho) e avançando como uma tira até o alto do rádio.[72]

Vale notar que Leonardo mostra acuradamente as ações dos músculos bíceps e pronador nesses desenhos, mas não as descreve na legenda, certo de que suas demonstrações visuais são mais eficientes que palavras.

Num fólio duplo da Coleção Windsor, encontramos outro estudo anatômico famoso, que mostra os músculos anteriores da perna e do pé (Fig. 4-7). Executado em três tons de tinta e giz marrom, com numerosos blocos de texto dispostos elegantemente ao redor, exibe um grau de sofisticação e delicadeza raramente ou nunca alcançado nas modernas ilustrações anatômicas.

No desenho, as saliências dos músculos extensores curtos, na frente do pé (classificadas como a, b, c, d), são maravilhosamente executadas, da mesma forma que os músculos extensores longos na frente e no lado da canela (classificados como f, n, r, s, t), que puxam o pé e os dedos para cima. Ao todo, cerca de dez músculos podem ser facilmente identificados.[73] No texto, Leonardo faz descrições

minuciosas das ações sinérgicas que produzem os movimentos complexos desses músculos do pé. No canto direito inferior da página dupla, meio oculto no texto, percebemos o desenho primorosamente executado da maneira como o tendão extensor se insere atrás do dedão do pé. Segundo O'Malley e Saunders, "nada que sequer se aproxime de tamanha minúcia será encontrado até uma época relativamente tardia".[74]

MÚSCULOS E NERVOS

Em seus estudos dos movimentos do corpo, Leonardo examinou vários deles, ao longo dos ossos, articulações e tendões, para determinar as contrações de músculos específicos; e também investigou os impulsos nervosos que acionam as contrações musculares, seguindo-os pelos nervos motores e a medula espinhal até o cérebro, onde acreditava estar localizada a sede da alma. Seu resumo conciso desse trajeto das forças motoras do corpo merece ser repetido:

> O movimento espiritual, fluindo pelos membros dos animais sencientes, alarga seus músculos. Assim alargados, eles se encurtam e repuxam os tendões a que estão presos. Eis a origem da força nos membros humanos (...). O movimento material brota do imaterial.[75]

A investigação do sistema nervoso foi o último passo que Leonardo deu nas demonstrações sistemáticas do corpo em movimento. Cronologicamente, porém, foi quando iniciou seu trabalho anatômico. Em *A Ciência de Leonardo da Vinci*, passei em revista as explorações detalhadas de Leonardo dos nervos cranianos, bem como sua teoria

neurológica da percepção e do conhecimento.[76] Em resumo, ele afirmou que os nervos sensoriais transportam todas as impressões dos sentidos para o cérebro, onde são selecionadas e integradas antes de penetrar na consciência, no ventrículo cerebral central (a “sede da alma”), a fim de ser aferidas pelo intelecto influenciado pela imaginação e depois entregues, em parte, à memória.

Leonardo, distinguindo entre nervos sensórios e nervos motores, acompanhou os impulsos nervosos dos movimentos voluntários desde o cérebro, passando pela medula espinhal e pelos nervos motores periféricos, até os músculos, tendões e ossos. Suas minuciosas explorações da anatomia do sistema nervoso começaram por volta de 1489, quando estava por volta dos 30 anos, e atingiram o ponto alto cerca de vinte anos depois, ao tempo em que também produziu os soberbos estudos de músculos e ossos acima discutidos.

Leonardo tinha uma visão integrada da alma, vendo-a tanto como agente da percepção e do conhecimento quanto como força responsável pela formação e o movimento do corpo.[77] O sistema nervoso, portanto, integrava todos os movimentos e atividades corporais. Os nervos sensórios transportavam as impressões dos sentidos para a alma e os nervos motores transmitiam forças da alma para os membros, onde os nervos, “tendo penetrado nas fibras musculares, ordenam-lhes que se movam”.[78]

Num desenho esquemático, produzido por volta de 1508, Leonardo revela que todos esses nervos são interconectados. Mostra o sistema nervoso inteiro: o cérebro, a medula espinhal e os nervos periféricos do

tronco, braços e pernas (Fig. 6-11). Apresenta o esquema de frente e do lado esquerdo. Entre as duas figuras há uma nota explicativa: “Árvore de todos os nervos; fica claro que eles têm sua origem no alto da medula espinhal e esta, no cérebro”.[79] Um pequeno esboço, também entre as duas figuras, apresenta outro perfil diagramático do sistema nervoso. A nota, embaixo, informa que as duas figuras mostradas nesse fólio são apenas o começo de um projeto bem mais ambicioso: “Em cada demonstração da extensão toda dos nervos, desenharemos os contornos externos, que dão forma ao corpo”.[80]

Não sabemos se Leonardo chegou a concretizar esse plano, mas, como produziu uma vista integral do esqueleto (Fig. 6-7) e outra dos órgãos internos (Fig. 4-5), mais ou menos na mesma época, não é temerário presumir que também haja apresentado o sistema nervoso inteiro num único fólio. Seja como for, nenhum desenho desses chegou até nós. A Coleção Windsor, todavia, contém numerosos estudos detalhados de várias partes do sistema nervoso.

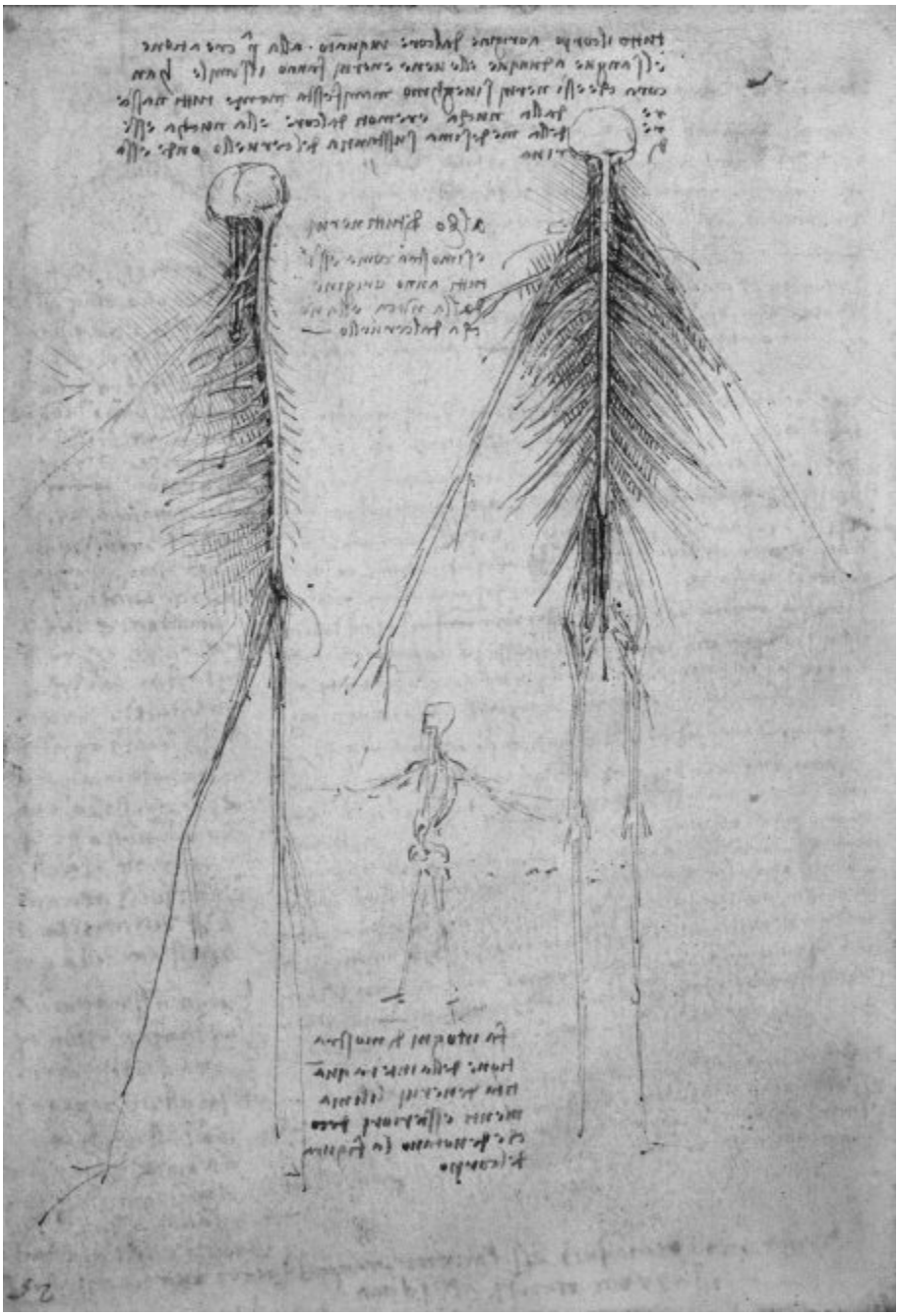


Figura 6-11: *"Árvore de todos os nervos", c. 1506-1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 76v.*

Os primeiros estudos se baseavam largamente em dissecções de animais e depois eram projetados no quadro humano. Mas, na época em que desenhou a "árvore dos nervos", Leonardo produziu diversos estudos acurados dos

nervos cranianos e intercostais, bem como dos nervos do ombro, mão e perna. Entre eles, temos um desenho conjugado (Fig. 6-12) que se fundamenta parcialmente em dissecções animais e no qual a curvatura da coluna vertebral, os músculos intercostais, os vasos e nervos pélvicos aparecem numa execução primorosa e clara.[81]

Uma área que fascinou Leonardo por duas décadas é o chamado plexo braquial, um feixe intricado de nervos que formam as conexões neurais entre o pescoço e os nervos do braço. Os primeiros estudos que fez dessa área, baseados em dissecções de macacos, datam de 1487 e contam-se entre seus primeiros desenhos anatômicos. O ponto alto foi atingido mais de vinte anos depois, com um desenho que representa perfeitamente o plexo braquial em toda a sua complexidade (Fig. 6-13).

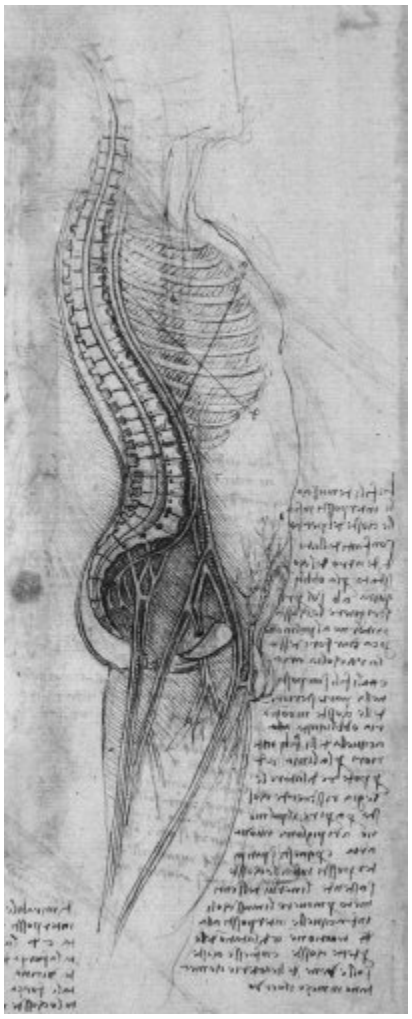


Figura 6-12: *Estudo da curvatura da coluna vertebral, músculos intercostais, vasos e nervos pélvicos, c. 1506-1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 109v.*

Acima do desenho principal desse fólio, Leonardo escreveu "*del vecchio*", esclarecendo que a dissecção fora realizada no "ancião" centenário do hospital de Santa Maria Nuova, em Florença. O estudo mostra, com exatidão, o plexo braquial formado pelos quatro nervos cervicais inferiores e o nervo espinhal que sai da primeira vértebra torácica. Sua extensão da parte inferior do lado do pescoço para a parte de baixo do braço é mostrada com clareza, o mesmo se aplicando ao padrão complexo que surge quando

os cinco nervos vão se dividindo, se misturando e se reunindo novamente. Segundo Kenneth Keele, “todo esse mapa do plexo braquial deveria ser considerado uma grande descoberta nas explorações [anatômicas] de Leonardo”.[82]

Depois de quinhentos anos, os desenhos anatômicos de Leonardo nada perderam de seu esplendor. Ainda admiramos sua impressionante exatidão e sofisticação, ficando sempre encantados com sua beleza. São um testemunho duradouro de seu gênio como cientista e artista.

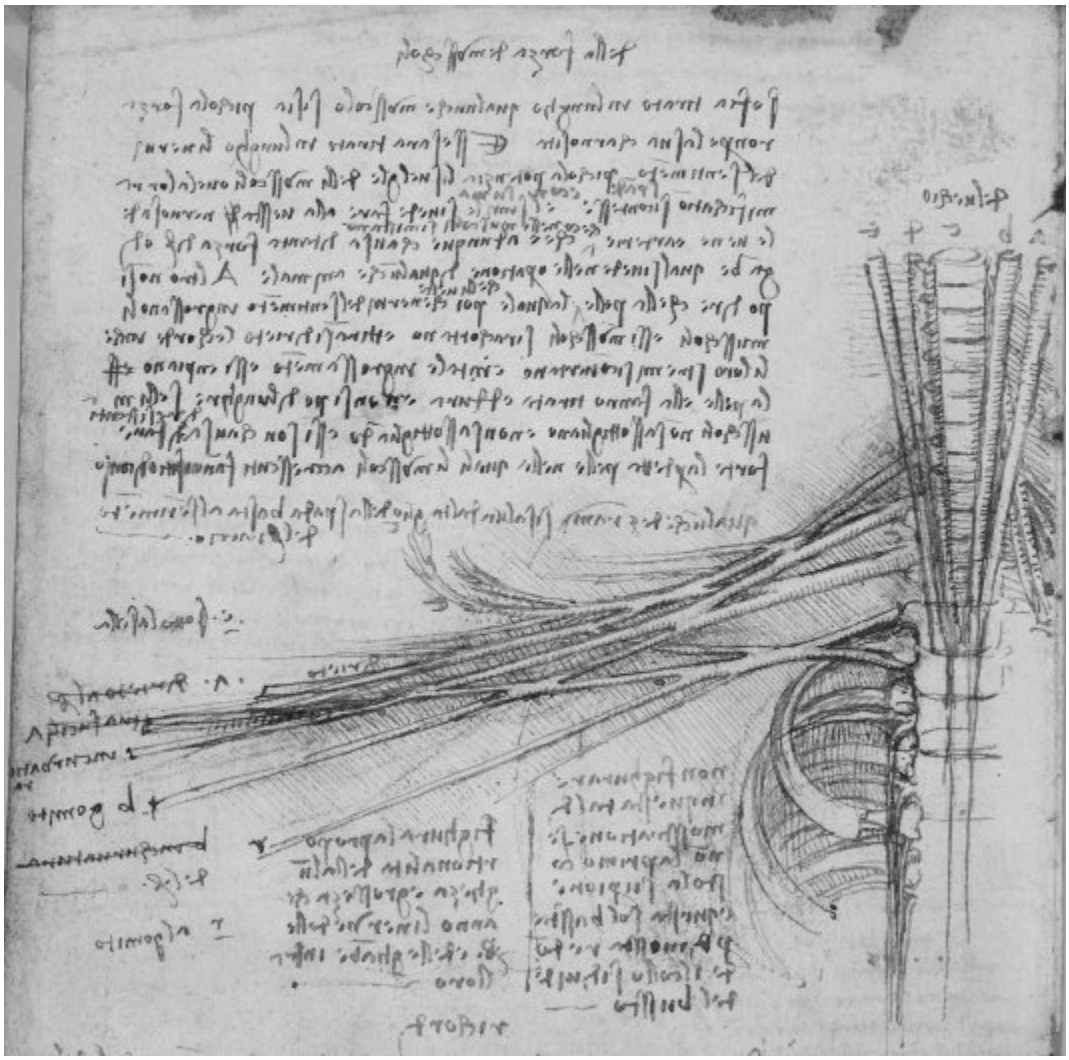


Figura 6-13: *O plexo braquial, c. 1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 57v.*

CAPÍTULO 7

A ciência do voo

Pelos textos que acompanham os desenhos anatômicos de Leonardo, sabemos que ele considerava o corpo humano um corpo animal, como os biólogos de hoje. Dissecou inúmeros corpos de animais e muitas vezes transferiu para o corpo humano o que aprendera com essas dissecções.[1] Mas, afora os aspectos pragmáticos, seus estudos de animais eram alicerçados num profundo respeito e compaixão pelas criaturas vivas.[2] Parecia-lhe, pois, natural "atribuir a mesma dignidade científica e ontológica a humanos e animais", como observa Domenico Laurenza.[3]

ANATOMIA COMPARATIVA

Leonardo usou suas dissecções de animais para obter conhecimento sobre as estruturas anatômicas humanas, mas também se interessava muito pelas inúmeras diferenças entre os corpos de animais e de homens. "Desenharemos, para fins dessa comparação", escreveu ele numa folha onde vemos os músculos superficiais das pernas de um homem, "pernas de rãs, que se parecem muito com as dos homens tanto nos ossos quanto nos músculos.

Prosseguiremos com as pernas traseiras de uma lebre, fortes e com músculos ágeis, não sobrecarregados de gordura”.[4]

O amor de Leonardo pelos cavalos era bem conhecido de seus contemporâneos. Ele produziu vários e magníficos estudos desses animais, hoje reunidos num volume especial da Coleção Windsor, e diz-se que escreveu um tratado inteiro sobre a anatomia do cavalo, hoje perdido.[5] No entanto, um fólio da Coleção Windsor traz um soberbo estudo que compara a anatomia da perna traseira do cavalo à da perna humana (Fig. 7-1). Em ambos os desenhos, alguns dos músculos do quadril são representados por “cordas”, a fim de mostrar as linhas de força exatas. Além disso, o que talvez seja ainda mais notável, a comparação entre os ossos da parte inferior da perna e do pé revela, em Leonardo, a plena compreensão de que, ao contrário da postura humana, o cavalo se firma na ponta do casco.

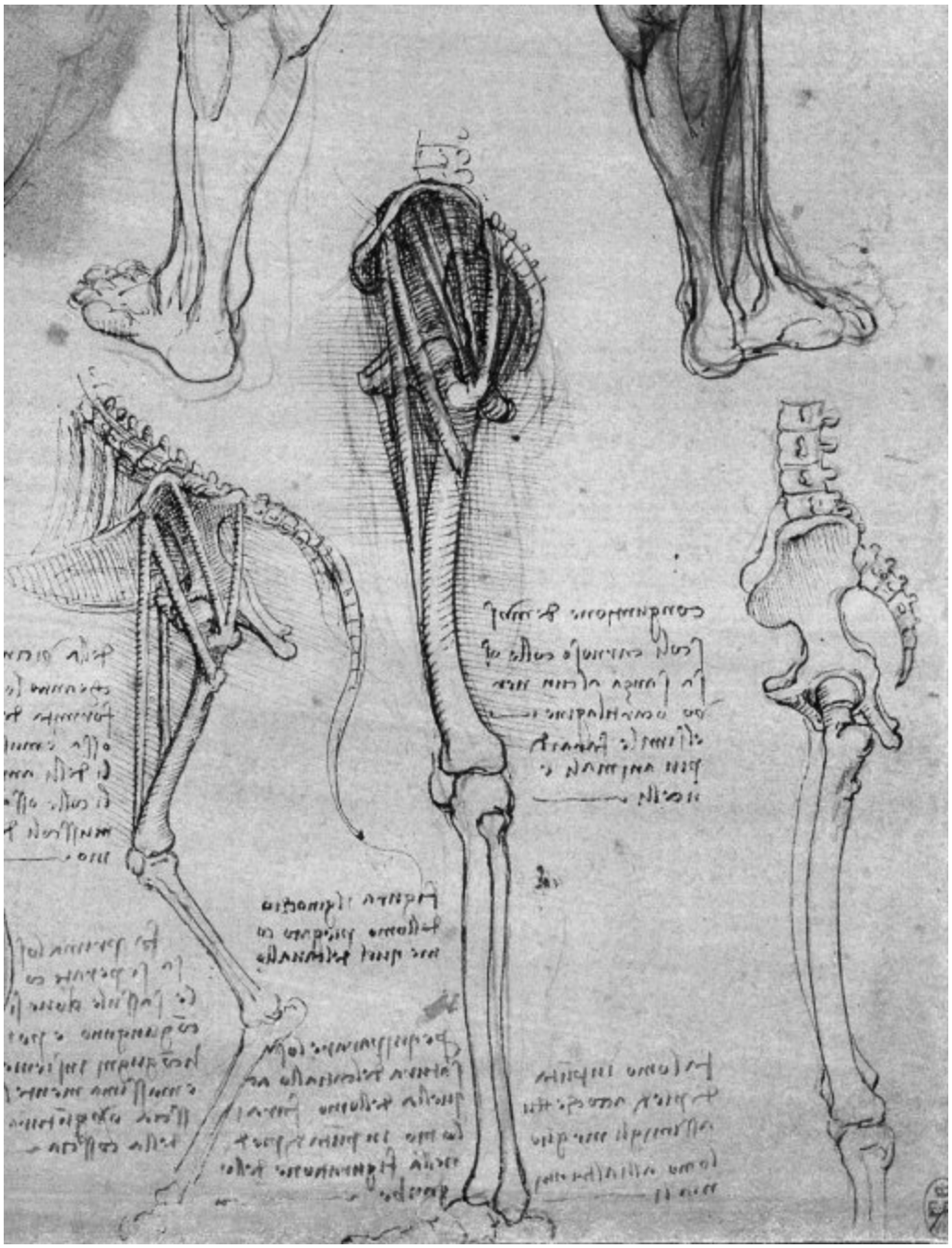


Figura 7-1: *Comparação da perna humana com a de um cavalo, c. 1507, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 95r (particular).*

Em vários de seus estudos comparativos, ele contrastou, em especial, os membros de alguns animais com os do corpo humano. Com efeito, entre os primeiros desenhos anatômicos, há uma curiosa série de quatro

estudos de uma pata de urso dissecada.[6] Ao longo dos anos, esses estudos comparativos de membros de animais acabaram levando Leonardo à importante conclusão de que suas diferentes estruturas devem ser vistas como variações de um único tema:

> Todos os animais terrestres se parecem nos membros, ou seja, nos músculos, tendões e ossos, que só variam em comprimento e espessura.[7]

Para Leonardo, a capacidade de reconhecer semelhanças anatômicas num amplo leque de espécies constituía a própria essência do "tornar-se universal" (*farsi universale*). Conforme já sugeri, essa consciência da "universalidade" corresponde ao que, na ciência contemporânea, chamamos de "pensamento sistêmico".[8]

O PENSAMENTO "EVOLUCIONÁRIO" DE LEONARDO

A postura de Leonardo frente às semelhanças dos membros dos mamíferos prenuncia um modo de pensar que ressurgiria na biologia do século XVIII e conduziria, finalmente, à formulação de uma das pedras angulares da biologia moderna: a teoria da evolução de Charles Darwin. A escola alemã da biologia romântica, que abrigava o grande poeta, dramaturgo e cientista Johann Wolfgang von Goethe, reconheceu, como Leonardo trezentos anos antes dela, uma unidade de padrões subjacentes às diferenças nas formas e tamanhos dos animais. Goethe, assim como outros biólogos e filósofos de sua escola, via nesses padrões a prova da existência de tipos orgânicos fundamentais, os "arquétipos" (*Urtypen*).[9] O conceito de arquétipo exerceu enorme in

fluência no pensamento biológico da França e da Inglaterra durante o século XIX. Darwin, em particular, reconheceu que essa teoria de sempenhara um papel fundamental na concepção primitiva da evolução biológica.[10]

Outra ideia básica, para Darwin, era a noção de mudanças graduais nas estruturas anatômicas ao longo de imensos períodos de tempo. Como já mencionei, essa ideia também é encontrada nos escritos de Leonardo, com referência a mudanças graduais não em estruturas anatômicas, mas em estratos e formações rochosas – os ossos da Terra viva.[11] Assim, Leonardo antecipou duas ideias fundamentais que seriam componentes importantes da primeira concepção de Darwin sobre a origem das espécies.

Uma vez que a ciência de Leonardo é das mais dinâmicas, não deve causar estranheza acharmos um sabor "evolucionário" em muitos de seus escritos científicos. Conforme dissemos, ele percebia as formas da natureza – de montanhas, rios, plantas e do corpo humano – como em estado de perene mudança e movimento. O mundo que Leonardo retrata, tanto na arte quanto na ciência, é um mundo em desenvolvimento e fluxo, no qual todas as configurações e formas são meras etapas num processo contínuo de transformação.

Ainda mais notável, porém, é o fato de Leonardo ter intuído as duas teorias contraditórias da evolução que dominariam o pensamento científico do século XIX: a evolução de sistemas físicos fechados da ordem para a desordem, descrita pelos físicos que desenvolveram a termodinâmica, e a evolução da vida da desordem para

uma ordem e complexidade crescentes, descrita por Darwin e outros biólogos.

Já discuti em detalhe como Leonardo antecipou a primeira e a segunda lei da termodinâmica, e como sua ampla compreensão da dissipação de energia lhe permitiu chegar a concepções profundas sobre a natureza dos processos irreversíveis – o "consumo" de formas naturais por influência de forças físicas em longos períodos de tempo.[12]

Leonardo não deixou de notar a contradição entre o fenômeno das transformações graduais da ordem para a desordem e a criação contínua de uma diversidade de vida cada vez maior, que ele também observou. A ciência moderna precisou de mais de cem anos para resolver o impasse entre as duas teorias da "evolução" vigentes no século XIX.[13] Na ciência de Leonardo, que nunca desenvolveu uma teoria de evolução biológica, essa contradição não existia. Para ele, o que havia eram duas tendências opostas nos fenômenos naturais, sendo que a evolução rumo à diversidade crescente das formas vivas sempre ultrapassava a tendência oposta da evolução rumo à crescente desordem. "A natureza caprichosa, dada ao prazer de gerar e produzir uma sucessão contínua de vidas e formas", escreveu ele no Codex Arundel, "mostra-se mais empenhada e rápida no criar do que o tempo no destruir".[14]

O SONHO DE VOAR

Como a pesquisa dos movimentos voluntários do corpo era um tema de destaque nos estudos anatômicos de Leonardo,

não é de admirar que ele também comparasse os movimentos humanos com os movimentos de vários animais. Em especial, analisou a andadura do cavalo e teceu paralelos com o modo de caminhar do homem:

> O passo do homem é sempre igual à andadura de todos os quadrúpedes; estes movem as pernas alternadamente, como o cavalo ao trotar, e o mesmo faz o homem com seus quatro membros: ou seja, quando adianta a perna direita, adianta ao mesmo tempo o braço esquerdo, e assim sucessivamente.[15]

Além da andadura dos animais terrestres, Leonardo estudou os movimentos dos peixes na água; mas nada o fascinava tanto quanto o voo dos pássaros. Foi isso que alimentou uma de suas grandes paixões na vida: o sonho de voar.

O sonho de voar é tão velho quanto a própria humanidade. Mas quem o perseguiu com mais engenho, perseverança e dedicação à pesquisa meticulosa foi Leonardo da Vinci. Desde seus primeiros anos em Florença, ele devia ter conhecimento da lenda do voo de Dédalo e Ícaro que, segundo a mitologia grega, escaparam de Creta usando asas feitas de penas de ave coladas com cera. Dédalo, o hábil artesão, aparece com suas poderosas asas num dos painéis esculpidos que decoram a parte inferior do campanário de Giotto (Fig. 7-2). Essa imagem pode ter sido ao mesmo tempo uma inspiração e um desafio para o jovem Leonardo, cujos primeiros desenhos de aves e insetos em pleno voo, bem como de asas artificiais, datam de cerca de 1470, quando ele acabara de se estabelecer em Florença para trabalhar como artista independente.[16] No mesmo período, pintou a *Anunciação*, na qual as asas inteiramente

realistas do anjo, presas a seus ombros, foram sem dúvida modeladas pelas asas reais de pássaros.[17]

Figura 7-2: *Andrea Pisano, O Mito de Dédalo, c. 1343, painel esculpido no campanário de Giotto, em Florença.*

Entretanto, Leonardo não tardou a concluir: voar como um pássaro exigiria mais que um par de asas engenhosamente fabricadas. Ele precisaria entender os detalhes sutis que garantem a sustentação das aves no ar e ser capaz de transferir o conhecimento desses princípios

para o desenho de uma máquina voadora. À medida que sua mente científica amadurecia, após a mudança para Milão, Leonardo começou a elaborar uma abordagem abrangente desse desafio, a qual envolvia numerosas disciplinas – da aerodinâmica à anatomia humana, da mecânica e da anatomia das aves à engenharia mecânica. Mergulhou diligentemente nesses estudos ao longo da maior parte de sua vida, dos primeiros anos na corte dos Sforza em Milão à velhice em Roma.[18] Projeto nenhum ilustra melhor a visão sistêmica e integrativa que Leonardo tinha da pesquisa científica, por ele tão brilhantemente aplicada à engenharia, bem como sua tenaz dedicação a imitar a natureza, do que essa duradoura busca da “ciência do voo”.

PRESSÃO ATMOSFÉRICA E FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

O primeiro período de intensa pesquisa de Leonardo com máquinas voadoras data do início dos anos 1490, cerca de uma década após sua chegada a Milão. A essa altura, ele já fora plenamente aceito como artista e “engenheiro ducal” pelos Sforza e se tornara o artista de corte favorito do príncipe Ludovico.[19] Tinha aposentos e um amplo espaço para seu estúdio na Corte Vecchia, onde o príncipe alojava convidados importantes, e ali desenvolveu uma série de atividades intelectuais e técnico-científicas. Estas incluíam a confecção de moldes para o *gran cavallo* (uma enorme estátua equestre em homenagem ao pai de Ludovico), a pintura da *Última Ceia* e os experimentos de óptica e

mecânica, além do desenho e teste de suas primeiras máquinas voadoras.

Com base nas primeiras observações de pássaros voando, Leonardo reconheceu que a compressão sob as asas, durante o curso descendente, era um elemento crítico para gerar força de sustentação. A aerodinâmica detalhada de um pássaro em voo é muito complexa e Leonardo só conseguiu compreendê-la bem anos mais tarde.[20] Todavia, mesmo suas explicações iniciais da sustentação aerodinâmica, nos anos 1490, já continham alguns achados importantes no âmbito da física do voo. Conforme observou o historiador da ciência Raffaele Giacomelli, esses achados parciais são impressionantes levando-se em conta o fato de, antes de Leonardo, nenhum filósofo natural ter procurado descobrir como os pássaros se sustentam no ar.[21] Na esteira de Aristóteles, pensava-se simplesmente que eles fossem amparados pelo ar assim como os navios o são pela água, funcionando suas asas e caudas como os remos e lemes das embarcações.

Observando o bater das asas dos pássaros, ele reconheceu nesse processo dois fenômenos de mecânica que já havia descoberto em outras circunstâncias. O primeiro era que, ao contrário da água, “o ar tem a capacidade de se comprimir e rarefazer”.[22] O segundo era o princípio, hoje conhecido como terceira lei do movimento de Newton, segundo o qual, para toda força física, existe uma força de reação igual e oposta.[23] Nos cadernos de notas, Leonardo mencionou os dois fenômenos várias vezes e, desde muito cedo, usou seu efeito combinado na tentativa de explicar a sustentação aerodinâmica.

Já no primeiro caderno de notas, o Codex Trivulzianus, iniciado no fim dos anos 1480, encontramos uma exposição concisa da ideia básica, ilustrada com dois exemplos corriqueiros:

> Quando a força gera mais velocidade que o escape do ar a ela resistente, esse ar é comprimido da mesma maneira que um colchão de penas sob o peso de quem está deitado. E o objeto que pressiona o ar, encontrando nele resistência, ricocheteia como uma bola atirada contra uma parede.[24]

Em suma, a sustentação aerodinâmica é explicada pela compressão do ar sob as asas durante a curva descendente e pelo ricochete do corpo do pássaro, que daí resulta.[25]

Numa passagem do Codex Atlanticus, escrito pela mesma época, Leonardo acrescenta à explicação outro princípio importante da mecânica – a relatividade do movimento –, que também registrou inúmeras vezes em diversos manuscritos.[26] Ele raciocina que, como o movimento de um objeto contra o ar parado equivale ao movimento do ar contra um objeto fixo, a força que sustenta uma águia no ar, durante as batidas das asas, corresponde à força do vento ao empurrar uma vela de navio:

> A força que o objeto exerce contra o ar é a mesma que o ar exerce contra o objeto. As asas, colidindo com o ar, sustentam a pesada águia nas alturas (...). E o ar, soprando nos mares, colide com as velas infladas, fazendo o barco carregado deslizar mais rápido.[27]

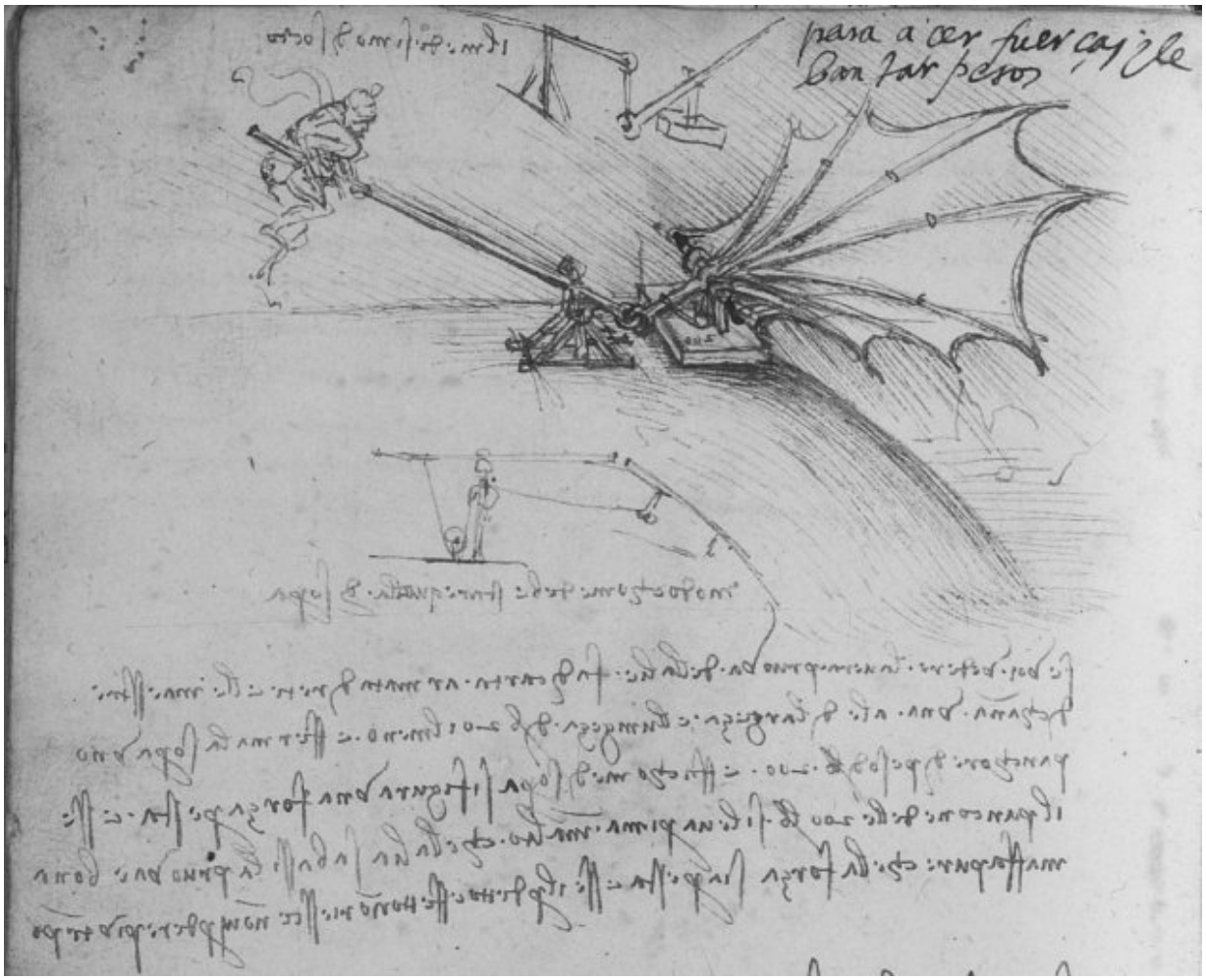


Figura 7-3: *Experimento para testar a capacidade humana de acionar com eficiência uma asa artificial, Ms. B, fólio 88v.*

A partir dessa observação, Leonardo conclui brilhantemente, no mesmo parágrafo: “Por tais razões, que estabelecemos e demonstramos, um homem com suas grandes asas articuladas, exercendo pressão contra a resistência do ar e superando-a, conseguirá alçar-se acima dele.” Assim, a crença de Leonardo na possibilidade do voo humano já existia desde suas primeiras pesquisas. A vida inteira, cultivou essa certeza inabalável. Sua firme convicção de que, no futuro, seres humanos seriam capazes

de voar como os pássaros não se baseava na esperança, mas em sólidos princípios científicos.

Certo de que, no caso do voo humano, o grande desafio era bater asas artificiais com força e velocidade suficientes para comprimir o ar embaixo e assim impulsionar o corpo para cima, Leonardo se dispôs a testar sistematicamente essa estratégia. Graças a uma série de experimentos realizados na Corte Vecchia, que combinavam mecânica e anatomia humana, ele avaliou meticulosamente a capacidade do corpo de gerar variadas quantidades de energia mecânica em diferentes posições.[28] Além disso, desenhou uma grande asa recoberta de membrana (Fig. 7-3) a fim de testar a possibilidade de batê-la eficientemente o bastante para erguer no ar uma prancha amarrada à sua base. O objetivo de todos esses estudos era descobrir como um piloto humano poderia levantar uma máquina voadora do chão batendo suas asas mecânicas.

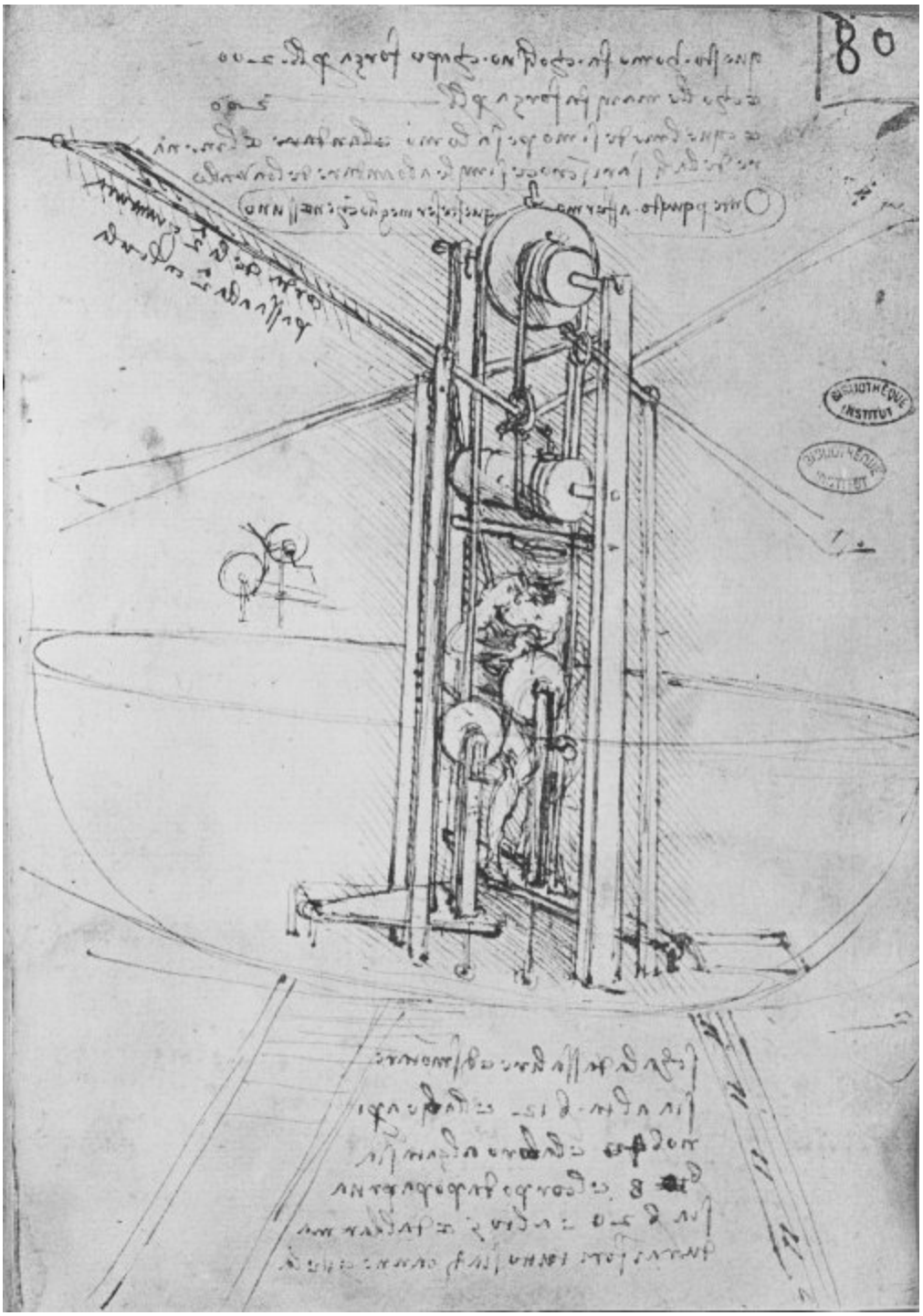


Figura 7-4: *O “navio voador” de Leonardo, Ms. B, fólio 80r.*

O primeiro desenho que Leonardo fez de um “navio voador”, basea do nesses experimentos, é uma geringonça estranha (Fig. 7-4). Mostra um aparelho vertical, provido de

quatro asas móveis, instalado numa espécie de vaso bojudo ao qual se tem acesso por uma escada e uma escotilha. O piloto, agachado no meio do aparelho, gera a força necessária acionando dois pedais e duas manivelas. Como observa Domenico Laurenza: “Não há nenhuma nota, nenhuma explicação (...) de como o piloto dirigiria a máquina em voo. Ele é, praticamente, um piloto automático: deve apenas gerar a força necessária para erguer-se do solo.”[29]

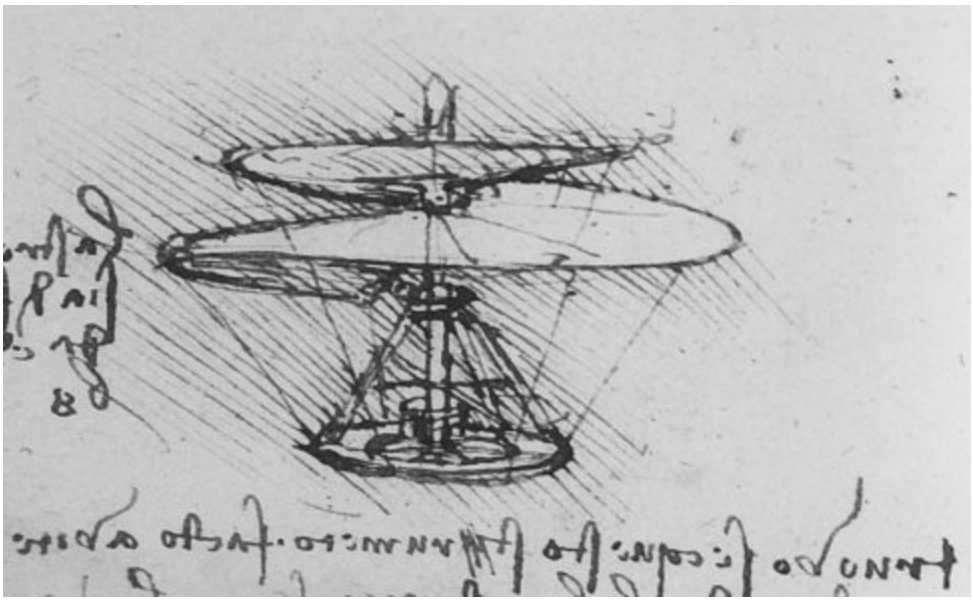


Figura 7-5: *O “parafuso aéreo”, Ms. B, fólio 83v.*

Outra máquina voadora desenhada por Leonardo mais ou menos na mesma época é o famoso “helicóptero” ou “parafuso aéreo”. Baseia-se na mesma ideia da sustentação devida à compressão do ar, agora por intermédio de uma superfície helicoidal que gira rapidamente através dele. Num fólio do Manuscrito B, Leonardo fez um pequeno esboço desse aparelho (Fig. 7-5), acompanhado de uma descrição sucinta de como ele funcionaria:

> A extremidade externa do parafuso será de fio de aço grosso como uma corda, com 8 *braccia* (cerca de 5 m) da circunferência ao centro. Penso que, se esse aparelho, na forma de parafuso, for bem construído – ou seja, feito de linho impermeabilizado com goma – e girado rapidamente, funcionará no ar como uma rosca fêmea e ganhará as alturas.[30]

Na mesma passagem, Leonardo sugere experimentar seu parafuso aéreo com "um pequeno modelo feito de papel, cujo eixo seja uma fina lâmina de aço que, fortemente encurvada, faça girar o parafuso depois de solta". É bem provável que ele tenha realmente construído um modelo funcional de acordo com esse projeto, bem semelhante, aliás, ao brinquedo de criança já conhecido em sua época e ainda hoje usado.[31] Entretanto, é duvidoso que a força muscular humana pudesse girar um parafuso aéreo, em tamanho natural, com velocidade suficiente para fazê-lo subir. Seja como for, reconhecemos facilmente aqui que o princípio aerodinâmico pelo qual o aparelho de Leonardo deveria erguer-se no ar também explica o funcionamento do helicóptero moderno.

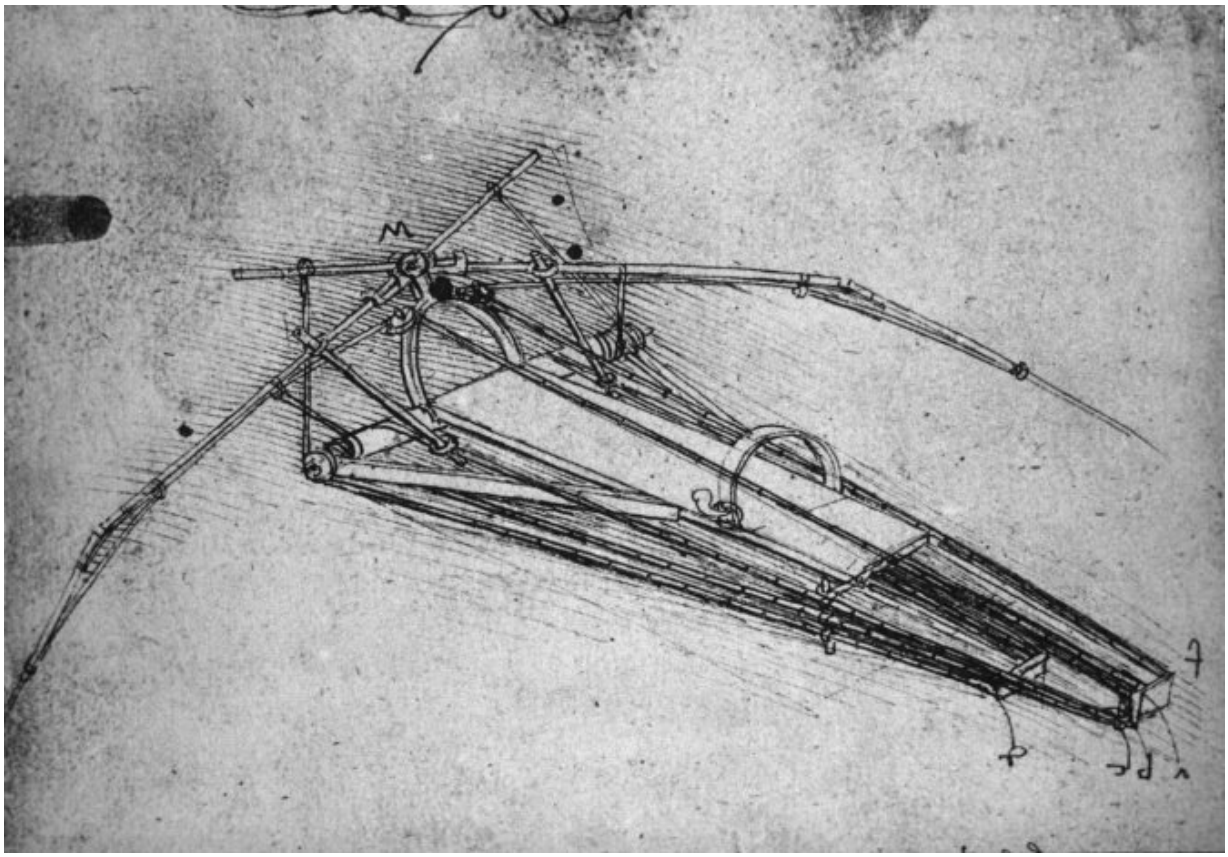


Figura 7-6: *Desenho de máquina voadora, Ms. B, fólio 74v.*

Durante esses mesmos anos, Leonardo desenhou outras máquinas realistas, para voo com asas móveis, nas quais o piloto se acomoda horizontalmente e controla a variedade de movimentos sutis com mãos e pés. Além desses, outros movimentos são produzidos automaticamente, por meio de molas. A Figura 7-6 mostra um exemplo dessa série de esboços. Trata-se de um desenho técnico primoroso, acompanhado por três conjuntos de notas explicativas postas em destaque na página. A prancha sobre a qual o piloto deve se deitar e os dois pedais que operam o movimento das asas estão claramente visíveis. As mãos e os braços do piloto são usados para manter o equilíbrio e mudar o rumo, mais ou menos como numa moderna asa-delta.

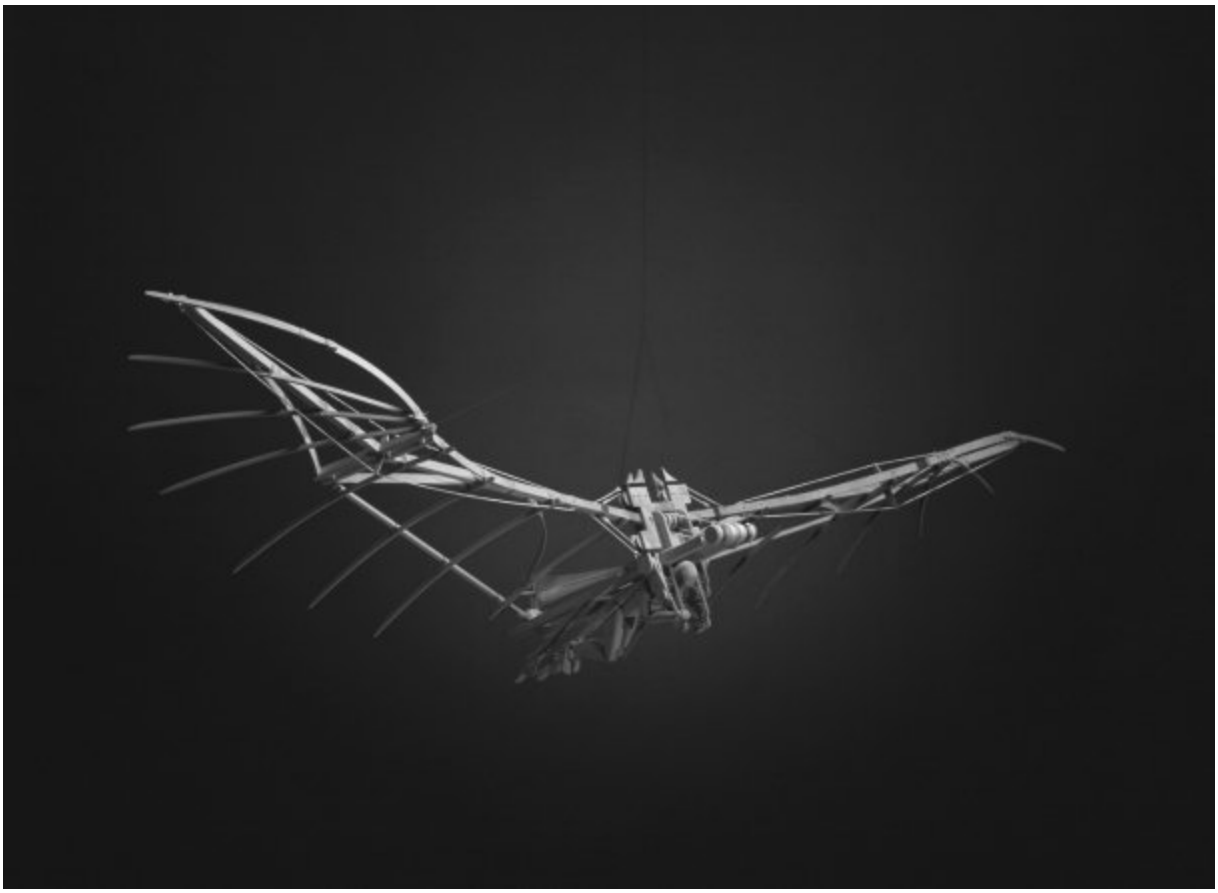


Figura 7-7: *Modelo funcional da máquina voadora, Museu de História da Ciência, Florença.*

Um exame mais atento do desenho e do texto de Leonardo revela que, durante a descida, as asas não apenas batem para comprimir o ar como se dobram para trás e para dentro, as pontas se voltando na direção dos pés do piloto.[32] Esse movimento elegante, que imita o das asas dos pássaros, é realizado por meio de um complexo sistema de juntas, polias e molas – uma obra-prima de engenharia mecânica das mais delicadas. A legenda recomenda prudentemente: “Deves experimentar essa máquina sobre um lago, trazendo preso ao cinto um grande odre de vinho inflado para não afundar caso despenque.”[33]

O desenho visto na Figura 7-6 é, juntamente com outros parecidos do mesmo período (constantes do Manuscrito B e do Codex Atlanticus), o que de melhor Leonardo produziu em matéria de projetos de máquinas voadoras. Esses desenhos serviram de base para vários modelos construídos por engenheiros modernos.[34] A Figura 7-7 mostra um deles, feito com materiais disponíveis na Renascença. A precariedade desses materiais – suportes de madeira, juntas de tiras de couro e coberturas de tecido grosso – explica por que Leonardo não poderia criar um modelo viável de suas máquinas voadoras, muito embora elas se fundamentassem em sólidos princípios aerodinâmicos. O peso combinado da máquina e do piloto era simplesmente grande demais para que só a força muscular o levantasse do chão.

BIOMIMETISMO

Por fim, Leonardo reconheceu que não conseguiria obter a proporção força-peso necessária para um voo de asas móveis bem-sucedido. Precisou de dez anos para chegar a essa conclusão, talvez porque, durante esse período de viagens frequentes pela Itália central, não dispusesse de tempo nem espaço adequado no estúdio para testar novos projetos de máquinas voadoras.[35] Todavia, mesmo em viagem, continuava registrando suas observações do voo dos pássaros em dois cadernos de bolso, hoje conhecidos como Manuscritos K e L.[36]

Quando finalmente se estabeleceu em Florença, Leonardo intensifi - cou seus estudos ornitológicos,

empreendendo observações cuidadosas e metódicas dos mínimos detalhes anatômicos e aerodinâmicos dos pássaros em voo. Passava horas nas colinas que cercam Florença, perto de Fiesole, onde podia ver águias, cisnes e outras aves de grande porte deslizando e planando no ar. Leonardo pretendia fazer delas modelos para novos desenhos de máquinas voadoras que imitassem a natureza ainda mais de perto, podendo ser manobradas com agilidade, manter o equilíbrio frente ao vento e movimentar as asas como um pássaro de verdade.

Resumiu suas observações e análises num pequeno caderno de notas intitulado “Codex sobre o Voo dos Pássaros”. Folheando esse elegante manuscrito, quase temos a impressão de que Leonardo gostaria de se transformar, ele próprio, numa ave. Não apenas chama a máquina voadora de *uccello* (“pássaro”) como emprega termos de anatomia para suas partes, falando, por exemplo, em “dedos” (pontas das asas) e em “tendões” (tirantes) que os movem. Em alguns trechos, passa com desenvoltura da terceira pessoa (ao descrever um pássaro em voo) para a segunda (dirigindo-se a si mesmo ou ao piloto da máquina), por exemplo, nesta série de instruções sobre o modo de conservar o equilíbrio frente ao vento:

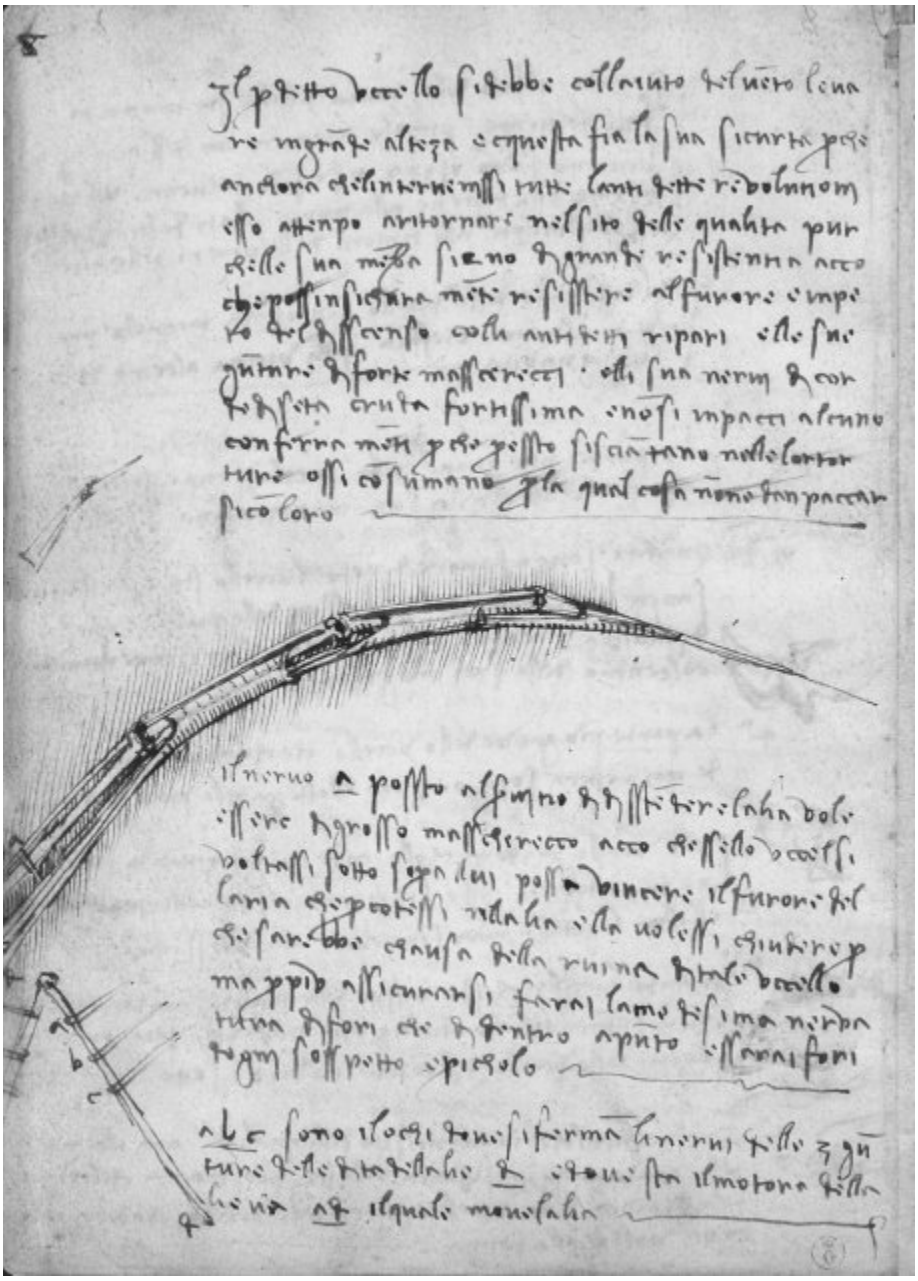


Figura 7-8: *Estudo de asa mecânica imitando uma asa de pássaro, Codex Sul Volo, folio 7r.*

> Se o pássaro quiser virar rapidamente para um lado (...). E se tu quiseres avançar para oeste sem bater as asas (...). O pássaro subirá bem alto (...) sempre virando para a direita ou para a esquerda (...). Se, em tua subida reta, o vento ameaçar desequilibrar-te, então poderás inclinar-te usando a asa direita ou esquerda (...).[37]

Essa fusão de identidades entre o pássaro real e o pássaro mecânico, no texto, é retomada, talvez de maneira ainda mais vívida, nos desenhos de Leonardo. Com efeito, seus esboços de asas mecânicas às vezes imitam tão à risca a estrutura anatômica das asas dos pássaros (por exemplo, na Fig. 7-8) que mesmo especialistas acham difícil apontar as diferenças. Conforme já dissemos anteriormente, a atitude de Leonardo de ver a natureza como modelo e inspiração vem sendo atualmente redescoberta na disciplina do desenho ecológico, especialmente na prática do biomimetismo.[38] Como Leonardo da Vinci há quinhentos anos, os ecodesigners hoje estudam a fundo as estruturas, padrões e fluxos do ambiente natural, procurando incorporar os princípios que os regem aos seus métodos de *design*.

O VOO DOS PÁSSAROS

Para bem avaliar a importância das ideias de Leonardo em física do voo, talvez seja útil rever o modo como os cientistas modernos explicam o voo dos pássaros. Mesmo um rápido olhar à literatura especializada revela que este é um assunto extremamente complexo e ainda não compreendido em todos os seus detalhes. A ciência do voo baseia-se na aerodinâmica, ela própria parte da disciplina mais geral, e notoriamente mais difícil, da dinâmica dos fluidos.[39] Mesmo com os poderosos supercomputadores de que dispõem, os cientistas atuais ainda não estão em condições de elaborar um modelo exato dos fluxos turbulentos em volta das superfícies de um aeroplano (ou

pássaro).[40] Mas, apesar dessas difi - culdades matemáticas, os aspectos básicos da “aerodinâmica animal” são hoje bem conhecidos.[41]

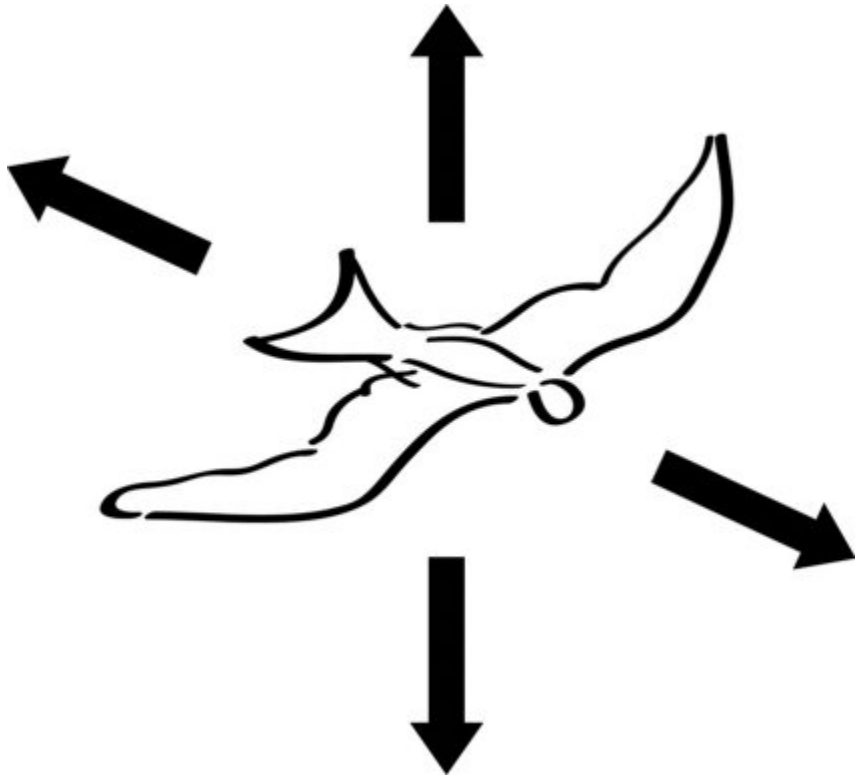


Figura 7-9: *Forças atuantes sobre um pássaro em voo planado.*

A fim de entender como os pássaros voam, é útil começar com o voo planado porque, nessa condição, um pássaro fica sujeito às mesmas forças que um planador de asas fixas. Há dois pares de forças que precisam se equilibrar no voo estável: o primeiro é o peso e a sustentação; o segundo, o impulso, que faz avançar, e o arrasto (ou atrito aerodinâmico), que freia o avanço (ver Fig. 7-9). A direção da sustentação é sempre perpendicular ao movimento da asa; será vertical apenas se esta se mover exatamente na horizontal (o que asas móveis quase nunca fazem).

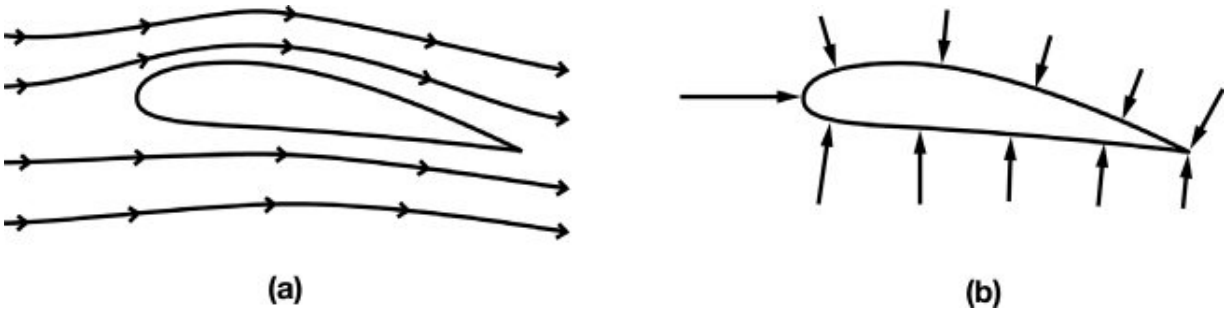


Figura 7-10: *Fluxo de ar contra o corte transversal de uma asa, mostrando as linhas de fluxo (a) e a distribuição de pressões na asa (b); extraído de Anderson (1997).*

Tanto a sustentação quanto o arrasto são gerados pelo fluxo de ar que passa pelas asas da ave. Os princípios são os mesmos do fluxo que contorna as asas de um aeroplano. A Figura 7-10a mostra um corte transversal da asa de um aeroplano, conhecido também como “aerofólio”, com quatro linhas indicando a direção do fluxo de ar que passa por ele. Essa pode ser a imagem tanto de uma asa atravessando o ar parado quanto do ar fluindo sobre uma asa imóvel num túnel de vento. Os dois pontos de vista são absolutamente equivalentes, como Leonardo da Vinci foi o primeiro a reconhecer.[42]

Quando o ar que chega atinge o bordo de ataque da asa, divide-se em duas partes: uma passa por cima, a outra por baixo. Devido ao formato especial do aerofólio, essa divisão não é simétrica. Em cima da asa, as linhas de fluxo se comprimem; embaixo, expandem-se, como se vê na Figura 7-10a. Em termos de velocidade, isso significa que a do fluxo de ar em cima da asa aumenta, enquanto a do fluxo de ar embaixo diminui.

Ora, há um teorema geral na dinâmica dos fluidos, conhecido como teorema de Bernoulli (de Daniel Bernoulli, o matemático do século XVIII que o demonstrou), segundo o

qual ao aumento da velocidade de fluxo de um líquido correspondente a diminuição de sua pressão, e vice-versa.[43] Assim, a distribuição da pressão do ar em volta da asa – sobretudo em relação às suas superfícies principais, a superior e a inferior – não é homogênea. A pressão contra a asa é maior embaixo (onde a velocidade do ar é menor) e menor em cima (onde a velocidade do ar é maior), como se vê na Figura 7-10b. Nesta, a seta mais comprida representa uma pressão maior, cujo efeito sobre a asa é de impulso para cima.

O impulso para cima, ou sustentação, gerado pelo movimento para a frente do avião ou pássaro, enfrenta a resistência oposta pelo ar. Essa resistência (ou arrasto) se deve principalmente ao atrito entre o corpo em movimento e o ar, que ocorre no ponto onde o ar e a superfície do corpo entram em contato. A chamada “resistência viscosa” não é, porém, o único fenômeno que se opõe ao movimento de um corpo em voo; outro obstáculo importante são os vórtices que se formam imediatamente atrás do objeto, em correspondência sobretudo com as asas e a cauda. Os engenheiros procuram, pois, considerar todos os obstáculos ao avanço do avião, ou seja, a “resistência total”.

O valor mais importante no *design* de uma asa é a relação sustentação-resistência (ou arrasto). Como o mesmo impulso produz tanto a sustentação quanto a resistência, esta, quando em correspondência com as asas, é decisiva para a eficiência da aeronave. Um quociente sustenta-ção-resistência mais alto significa que um impulso menor (e, portanto, menos combustível) podem produzir a sustentação necessária. Na moderna aerodinâmica, o

cálculo da sustentação apresenta poucas difi - culdades; o da resistência, contudo, não é tão fácil. Isso se deve ao papel crucial desempenhado pelas turbulências complicadas e desordenadas na geração da resistência. Além das turbulências posteriores, ou de cauda, e laterais (em direção às pontas das asas) a que já nos referimos, convém lembrar que todo o fluxo de ar nas imediações do corpo em voo (a "camada-limite"), tende a se tornar turbulento. Essas turbulências complicam muito os cálculos e dificultam a elaboração de bons modelos matemáticos para a resistência de uma aeronave.

Figura 7-11: *Ângulo de ataque, α, de um aerofólio curvado.*

A sustentação que uma determinada quantidade de impulso fornece depende não apenas da forma do aerofólio, mas também de seu ângulo em relação ao ar atravessado (ver Fig. 7-11). Se o aerofólio estiver erguido, a sustentação aumentará com o "ângulo de ataque". Mesmo uma asa plana, em que o ar flui igualmente por cima e por baixo, proporciona alguma sustentação quando seu ângulo de ataque é aumentado. No entanto, um aerofólio convexo ou "curvo" produzirá mais sustentação e menos arrasto. Veremos que as aves conseguem ajustar tanto o ângulo de ataque quanto a curvatura das asas para se movimentar efi - cientemente em diversas situações.

Convém acrescentar que o aumento de sustentação gerado pela inclinação da asa só vale dentro de certos limites; quando estes são superados, ocorre o estol (perda de sustentação): o fluxo na superfície superior da asa gera uma forte esteira de turbulência, que provoca uma súbita perda de sustentação e um aumento do arrasto. A maioria dos aeroplanos, nesse caso, parará de voar e começará a cair. Os pássaros, curiosamente, usam o recurso do estol com muita eficiência nas manobras de pouso. Pouco antes de tocar o poleiro, eles aguçam o ângulo de ataque e, num estol bem cronometrado, perdem velocidade e pousam em segurança.

O voo planado é a forma mais simples de deslocamento pelo ar e alguns pássaros o praticam a maior parte do tempo em que estão voando. Além disso, águias, falcões e muitas outras aves usam uma forma especial desse voo chamada “pairado”, que lhes permite permanecer nas alturas por prazo indefinido sem bater as asas, usando apenas as correntes ascendentes de ar para prolongar seu tempo de voo. Cegonhas e albatrozes pairam com maestria. Podem fazê-lo dias seguidos sobre o mar, chegando a atravessar um oceano inteiro sem bater as asas.[44]

Uma elevada proporção sustentação-arrasto é essencial para o voo pairado. Albatrozes e outras aves grandes conseguem essa proporção graças às suas asas longas e estreitas. Aves terrestres menores, como os gaviões e os falcões, ajustam as asas curvando suas articulações, reduzindo a área para planar rápido e expandindo-a para pairar. E há mais: certos pássaros, a fim de pairar, abrem amplamente as penas “primárias” das pontas das asas. Isso

reduz os vórtices que se formam atrás delas e, portanto, aumenta a proporção sustentação-arrasto.

Com esse conhecimento da dinâmica básica dos voos planado e pairado, podemos examinar agora as ações bem mais complexas do voo com asas móveis. A descoberta mais importante da moderna aerodinâmica animal, e que parece até certo ponto um contrassenso, foi que os pássaros e outros animais voadores não batem as asas para se manter no ar e sim para gerar impulso. Quando avançam contra o ar, suas asas também geram sustentação, pois têm forma aerodinâmica, tal como no voo planado. Isso quer dizer que, a fim de produzir o necessário impulso para a frente, o bater das asas de um pássaro deve ser bem mais complexo do que um simples movimento para cima e para baixo.

Com efeito, filmes em câmera lenta de pássaros voando revelaram que eles não batem as asas verticalmente, mas seguem padrões intricados que combinam vários tipos de movimento.[45] O trajeto da ponta da asa é curvo, semelhante ao nado borboleta dos atletas, mas a curva se afasta da vertical em mais ou menos 30 graus – para baixo e para a frente na descida, para cima e para trás na subida. A sustentação assim produzida se estende para diante, de modo que o bater das asas gera ao mesmo tempo sustentação e impulso. No caso de pássaros de grande porte como o albatroz, o trajeto da ponta das asas é oval; os pássaros menores descrevem um “8”, ao passo que os insetos voadores traçam todos os tipos de circuitos complicados.

Além de mover as asas ao longo de uma curva inclinada, os pássaros ampliam o ângulo de ataque ao baixá-las e diminuem-no ao levantá-las; e muitos modificam a área das asas recolhendo as penas primárias de voo na parte externa, como um leque, e aproximando as asas do corpo ao levantá-las a fim de reduzir sua superfície funcional. Todos esses movimentos se combinam para gerar o máximo de impulso e sustentação possível quando as asas se abaixam e o mínimo de arrasto possível quando se levantam.

Como a asa se move para baixo e para a frente, a parte próxima à sua base (junto ao corpo do pássaro) recebe certa quantidade de vento devido ao movimento para diante, que é quase horizontal, de sorte que ali a sustentação é mais ou menos vertical. A ponta da asa, ao contrário, receberá um fluxo de ar causado tanto pelo movimento para a frente quanto pelo bater da asa. Será mais rápido do que na base e se aproximará da asa por baixo. Consequentemente, a sustentação perto da ponta será mais forte e inclinada para a frente. No voo com movimento de asas, a força e a direção do fluxo de ar mudam gradualmente ao longo de sua envergadura, produzindo a maior parte da sustentação na superfície interna das asas e a maior parte do impulso perto das pontas.

Entender como os pássaros voam pressupõe muitos outros aspectos. Assim como os animais terrestres usam diferentes andaduras para diferentes velocidades, os pássaros usam diferentes movimentos de asas para voos lentos e rápidos. Esses movimentos diferem não apenas em termos de velocidade, mas também de espécie para

espécie. Não bastasse isso, os pássaros utilizam diversas manobras sutis para decolar e pousar; girar, subir e descer; manter a direção no vento; e, em se tratando de espécimes pequenos (e insetos), permanecer suspensos no ar parado. Com olho arguto, Leonardo observou os mínimos detalhes desses movimentos, descrevendo-os com a maior exatidão e registrando-os em desenhos cheios de vida e encanto. A pergunta crítica é: até que ponto ele chegou a compreender o voo dos pássaros?

A AERODINÂMICA DE LEONARDO

O primeiro grande feito de Leonardo ao formular uma adequada ciência do voo foi a constatação de que essa ciência deveria fundamentar-se na aerodinâmica, para empregarmos um termo moderno. “A fim de criar a verdadeira ciência do movimento das aves no ar”, escreveu posteriormente, resumindo mais de trinta anos de pesquisas, “é necessário primeiro criar a ciência dos ventos, que demonstraremos com base nos movimentos da água dentro de si mesma”.[46] Nessa passagem, Leonardo afirma não apenas que a ciência do voo deve ter por base uma sólida aerodinâmica (“a ciência dos ventos”), mas também que os fluxos de ar podem ser comparados à água corrente, ambos descritos pela mesma disciplina: a dinâmica dos fluidos, como diríamos hoje.

Como a descoberta dos princípios básicos da dinâmica dos fluidos foi uma das maiores façanhas científicas de Leonardo,[47] não é de surpreender que seus estudos da aerodinâmica do voo o conduzissem a inúmeras ideias

pioneiras. Conforme mencionamos anteriormente, ele foi o primeiro a reconhecer, e a formular com clareza, o princípio da relatividade do movimento, segundo o qual um corpo que se move pelo ar parado equivale a um corpo imóvel imerso num fluxo de ar. “Mover o objeto contra o ar parado”, escreveu ele por volta de 1505, “é o mesmo que mover o ar contra o objeto imóvel”.[48] Hoje, isso é conhecido como o princípio do túnel de vento, a ferramenta experimental mais importante da moderna aerodinâmica.

Leonardo também percebeu o seguinte detalhe: a relatividade do movimento implica que a sustentação aerodinâmica seja gerada pelas mesmas forças tanto no voo com movimento de asas quanto no voo planado. A passagem do Codex Atlanticus continua: “Assim, as pesadas asas, batendo no ar rarefeito, fazem com que ele se comprima e resista à descida do pássaro. E, ao mover-se contra as asas imóveis, esse ar sustenta o peso do pássaro.” Na última parte do trecho, Leonardo examina os três tipos de voo planado – ascendente, descendente e estacionário:

> Quando a força do movimento do ar é igual à força da descida do pássaro, este permanece imóvel; quando a força do movimento do ar é mais forte, prevalece e empurra o pássaro para cima; e, quando a força do movimento do ar é menor que o peso do pássaro, este desce.

Em outro fólio do Codex Atlanticus, Leonardo reitera a identidade dos princípios aerodinâmicos que presidem ao voo planado e ao voo com bater de asas:

> Quando o pássaro está no vento, pode sustentar-se sem bater as asas, pois a função que a asa desempenha contra o ar parado é a mesma que o ar em movimento desempenha contra a asa imóvel.[49]

Dessa época em diante, as notas de Leonardo passaram a tratar o voo planado e o voo com bater de asas como fenômenos equivalentes. Tanto na primeira série de notas do Manuscrito K quanto nos registros mais extensos do Codex sobre o Voo dos Pássaros, o movimento das aves é analisado a partir desses dois pontos de vista.

Em muitos estudos do voo, Leonardo enfatizou a ideia de que os pássaros são sustentados no ar pela compressão deste sob suas asas, compressão que provoca um ricochete para cima. A explicação é parcialmente correta, mas não esgota o assunto. Hoje, sabemos que a sustentação aerodinâmica é consequência ao mesmo tempo da pressão do ar sob as asas e da *diferença* de pressão entre o ar em cima e embaixo delas, com a pressão baixa em cima gerando na verdade a maior parte da sustentação.

Mais tarde, porém, Leonardo compreendeu a importância do ar rarefeito em cima da asa. De fato, o Manuscrito E, composto por volta de 1513-1515, quando ele tinha mais de 60 anos, contém uma descrição exata das densidades atmosféricas em volta do corpo do pássaro em voo:

> O ar ao redor dos pássaros é, em cima, mais rarefeito que em geral o outro ar, assim como, embaixo, é mais denso que ele; é mais rarefeito atrás (...) é mais denso na frente do pássaro.[50]

Se substituirmos os termos “ar rarefeito” e “ar denso”, nessa passagem, por “baixa pressão” e “alta pressão”, lembrando-nos de que o conceito de pressão dos gases só foi definido com clareza no século XVII,[51] a descrição resultante será muito semelhante ao modo como a

distribuição de pressão em volta de um aerofólio aparece na moderna aerodinâmica (ver Fig. 7-10b).

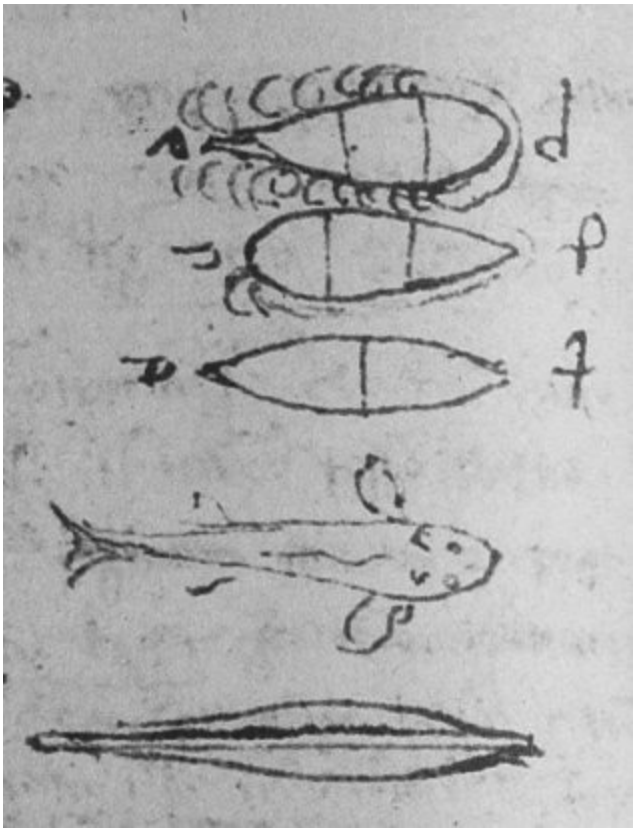


Figura 7-12: *Formas hidrodinâmicas de navios e peixes, Ms. G, fólio 50v.*

O fluxo de ar em volta das asas de um pássaro produz não apenas a sustentação para cima como também uma resistência ao movimento para diante, devido ao obstáculo na frente do pássaro e à turbulência atrás das asas.[52] Quando Leonardo examinou essas forças, já vinha há anos se esforçando para entender a inércia e a dissipação de energia nos corpos em movimento, que analisou em termos da teoria medieval do “ímpeto”. Na época em que compôs o Codex sobre o Voo dos Pássaros, convencera-se de que o arrasto era provocado pela resistência do ar comprimido na

frente do objeto em movimento, bem como pela turbulência atrás dele.[53]

Leonardo pesquisou os efeitos do arrasto em movimentos tanto no ar quanto na água. Um esboço no Manuscrito G mostra três navios de formas diferentes e dois tipos de peixes (Fig. 7-12). As duas causas do arrasto – a resistência da água na frente do navio e a turbulência aos lados e atrás – são claramente visíveis no esboço. Leonardo conclui que o arrasto no navio mostrado na parte de cima deve ser mínimo por causa de sua forma aerodinâmica (como diríamos hoje) e observa que “ele lembra a forma de pássaros e peixes como o mugem”.[54]

Leonardo tentou também quantificar a resistência encontrada por um corpo que se move pelo ar.[55] Postulou corretamente que ela é proporcional à superfície do corpo e, incorretamente, à sua velocidade (a resistência do ar é proporcional ao quadrado da velocidade). Com toda a certeza, o último postulado deveu-se simplesmente à crença de Leonardo no papel privilegiado das relações lineares na natureza, também aceito por Galileu em suas primeiras obras.[56]

O CODEX SOBRE O VOO DOS PÁSSAROS

No Codex sobre o Voo dos Pássaros (*Codice sul volo degli uccelli* ou Codex *Sul Volo*, para abreviar), Leonardo resumiu as observações e análises sobre o assunto que fez em Florença durante um período de dois anos, entre 1503 e 1505. Esse caderno de notas, pequeno e elegante, está repleto de encantadores desenhos de pássaros em pleno

voo (por exemplo, Fig. 7-13), com descrições detalhadas de suas manobras no ar e de sua capacidade de manter o equilíbrio no vento. Veem-se ali também diversos aspectos sutis do voo ativo, bem como esboços de mecanismos complexos que concebeu para imitar os movimentos precisos das aves.

Quando registrou suas observações ocasionais de pássaros em voo, durante as viagens que empreendeu pela Itália central, Leonardo já tinha em mente um tratado sobre o assunto. No Manuscrito K, um dos cadernos de notas que sempre levava consigo por essa época, esboçou um plano bastante claro para a obra:

> Dividir o tratado dos pássaros em quatro livros: o primeiro sobre o voo conseguido pelo bater das asas; o segundo sobre o voo sem o bater das asas, sustentado pelo vento; o terceiro sobre o voo comum às aves, morcegos, peixes, animais, insetos; e o último sobre o movimento instrumental.[57]

No Codex *Sul Volo*, Leonardo seguiu mais ou menos esse plano. Por algum motivo, compôs os fólios desse caderno de notas em ordem inversa, de sorte que a sequência conceitual vai de trás para a frente.[58] A primeira parte (fólios com números altos) trata principalmente do voo conseguido pelo bater das asas, enquanto a segunda (fólios com números baixos) contém anotações sobre como as aves planam, pairam e manobram no vento. Em ambas, as observações sobre o voo dos pássaros são acompanhadas por esboços e mecanismos concebidos para imitar esses movimentos naturais com um “pássaro” mecânico.

No primeiro fólio do Codex *Sul Volo* (fólio 18r na ordem inversa), Leonardo resumiu os pontos capitais de sua análise sobre o voo conseguido pelo bater das asas em seis parágrafos curtos. Um aspecto curioso dessas notas é que ele chama, muito naturalmente, os ossos e articulações da asa do pássaro de “cotovelos”, “mãos”, “dedos” e por aí além. Eis um testemunho eloquente da maturidade de seus estudos em anatomia comparada. Mesmo hoje, em ornitologia, os anatomistas falam em cotovelos da asa e articulações do pulso, mãos (tecnicamente co nhecidas como carpometacarpos), polegares (álulas) e dedos.[59] Num estudo anatômico da asa do pássaro constante da Coleção Windsor (Fig. 7-14), feito alguns anos mais tarde, esses ossos e articulações, juntamente com seus tendões e ligamentos, são mostrados com grande exatidão. Nada mais evidente que sua correspondência com os famosos estudos por ele elaborados sobre os ossos do braço e da mão humana.

Figura 7-13: *Pássaros em voo, Codex Sul Volo, fólio 8r.*

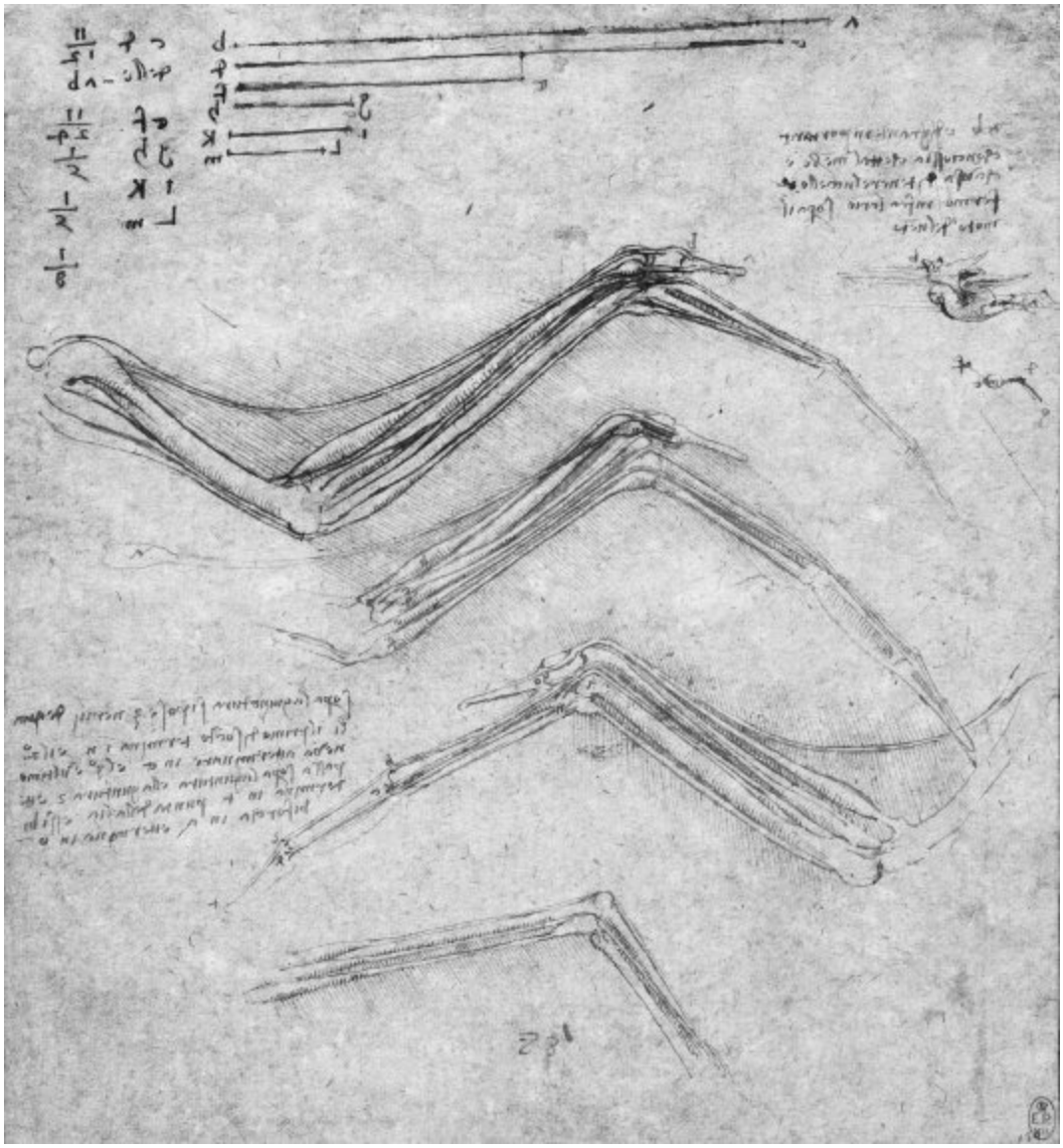


Figura 7-14: *Anatomia da asa de um pássaro, c. 1513, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 187v.*

Antes de avaliar a descrição que Leonardo faz do voo com bater de asas, devo resumir mais uma vez as principais características do movimento das asas do pássaro que foram identificadas pelos modernos ornitólogos.[60] A batida da asa ocorre a partir da vertical, indo para a frente quando ela desce e para trás quando ela sobe. Além disso, é

encurvada de modo que a ponta descreve uma oval ou outra curva mais complexa. O ângulo de ataque aumenta quando a asa desce e diminui quando sobe. As penas primárias se abrem totalmente quando a asa desce e se fecham como um leque quando a asa sobe, aproximando-se do corpo do pássaro. Assim como no voo planado, a diferença de pressão entre a parte alta e a parte baixa do aerofólio se traduz em força pura na asa; e, devido ao trajeto curvo da batida da asa, essa força se projeta para diante, gerando ao mesmo tempo suspensão e impulso. Num movimento tão complexo, quase toda a suspensão é produzida ao longo da parte interna da asa e quase todo o impulso, perto da ponta.

Considerando-se o fato de que os detalhes sutis da dinâmica do voo planado só foram percebidos recentemente, com a ajuda da fotografia de alta velocidade e da filmagem em câmera lenta, é verdadeiramente impressionante que tantas de suas características básicas tenham sido identificadas com exatidão apenas pelo olhar aguçado e pela grande capacidade de visualização de Leonardo. Ao descrever as batidas da asa, ele observa seu movimento para baixo e para a frente, mostrando de maneira precisa que seu ângulo de ataque se ergue quando a asa abaixa (quando o cotovelo se curva para baixo):

> O abaixamento dos cotovelos no instante em que a ave adianta o bordo das asas contra o vento, mais ou menos lateralmente, guiada pelo ímpeto já adquirido, é o motivo pelo qual o vento sopra sob o cotovelo e se torna uma cunha sobre a qual a ave, graças ao ímpeto mencionado e sem bater as asas, consegue se erguer.[61]

A suspensão é atribuída corretamente ao fluxo relativo de ar criado pelo impulso (“ímpeto”) quando o ângulo de ataque se eleva (“mais ou menos lateralmente”); mas, como em outras passagens, Leonardo não reconhece o importante papel da pressão baixa em cima da asa, atribuindo a suspensão toda à pressão alta (“cunha”) por baixo dela.

No mesmo fólio, Leonardo nota também que, durante a batida das asas, o trajeto das pontas não é reto, mas descreve uma oval. “O curso das pontas dos dedos não é o mesmo na ida e na volta”, escreve ele, “mas descreve uma linha mais alta ao ir e mais baixa ao voltar; a figura formada pelas linhas alta e baixa é uma oval longa e estreita”.

Fato mais notável ainda, no mesmo fólio 18r ele esboça as mudanças no ângulo de ataque ao longo dessa oval, num pequeno desenho (Fig. 7-15) acompanhado da seguinte nota:

> A palma da mão se desloca de *a* para *b* [descida] sempre mais ou menos no mesmo ângulo, pressionando o ar para baixo, e em *b* ela imediatamente vai para o lado e recua, alçando-se ao longo da linha *cd* [subida]; chegando a *d*, vira-se imediatamente de frente e mergulha ao longo da linha *ab*, girando sempre em torno do centro de sua largura.

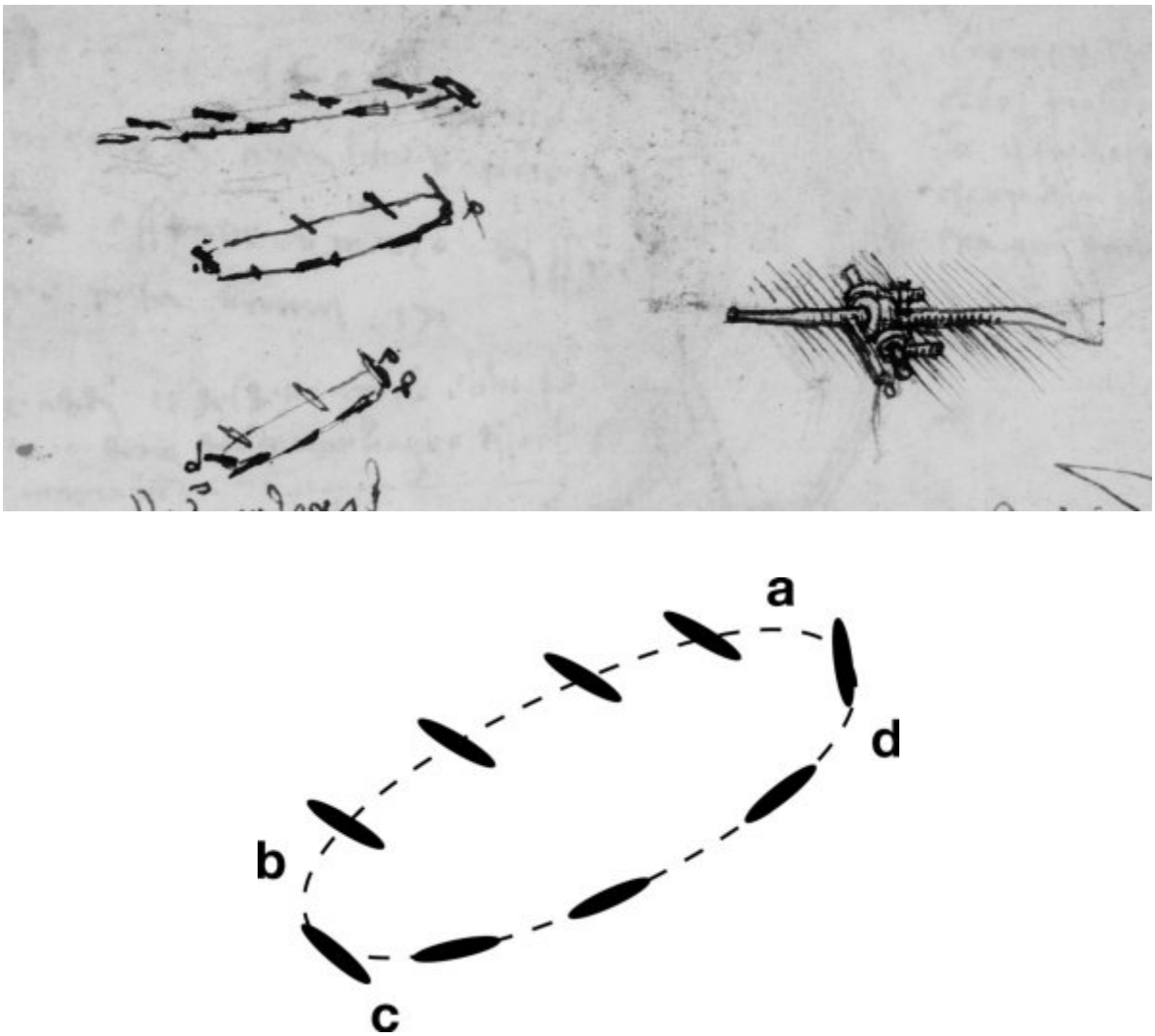


Figura 7-15: *Mudanças de ângulo de ataque ao longo de uma batida de asa oval, Codex Sul Volo, fólio 18r, e reconstrução.*

Como fazem hoje os ornitólogos, Leonardo comparava esse movimento circular ao que o nadador descreve com a mão. No Manuscrito F, composto alguns anos depois do Codex *Sul Volo*, ele anotou:

> A asa do pássaro no ar opera do mesmo modo que a mão do nadador quando ele fere a água e pressiona-a, fazendo seu corpo deslizar para a frente em movimento contrário.[62]

Finalmente, Leonardo não deixou de perceber que o pássaro produz impulso e sustentação com duas partes diferentes da asa. O impulso (*impetus*) é gerado pela parte externa (a "mão"), explica ele, e a sustentação pela elevação do ângulo de ataque da parte interna (o "cotovelo"):

> A mão da ave é que provoca o ímpeto e depois seu cotovelo (...) assume uma posição oblíqua, de modo que o ar no qual repousa se torna também oblíquo, como se tivesse a forma de uma cunha a partir da qual a asa se ergue.[63]

Ao que parece, Leonardo notara as diferentes funções das partes interna e externa da asa mesmo antes de fazer observações metódicas do voo dos pássaros em Florença. Durante suas viagens em anos anteriores, ele anotara isto de passagem em seu caderno de bolso: "A parte externa da mão faz o pássaro permanecer no alto e a parte interna o faz ir para a frente."[64]

Nas notas de Leonardo sobre pássaros em pleno voo, há também algumas contradições e constatações errôneas, o que não chega a surpreender se considerarmos a enorme complexidade da matéria. No entanto, o Codex *Sul Volo* não deixa dúvida de que ele captou os traços essenciais tanto do voo planado quanto do voo com asas móveis. É o que conclui o engenheiro aeronáutico John Anderson em sua *History of Aerodynamics*: "Sem dúvida, Leonardo foi a primeira pessoa a entender a mecânica do voo dos pássaros."[65]

No Codex *Sul Volo*, o resumo de Leonardo de sua compreensão do voo com asas móveis é imediatamente seguido por dois fólios com desenhos de asas mecânicas. O

primeiro desenho (Fig. 7-16) mostra a asa esquerda da máquina vista de frente: está conectada a dois pedais por meio de um sistema de cordas e polias, que permitem ao piloto levantá-la e baixá-la com os pés. Além disso, a asa pode ser girada e mudar o ângulo de ataque por meio de uma espécie de guidão, que o piloto opera com as mãos. É óbvio que Leonardo tentou, aqui, imitar o mais de perto possível os movimentos complexos do voo com asas móveis, que descrevera no fólio precedente.

Enquanto estudava o movimento dos pássaros em voo e desenhava asas mecânicas para imitá-lo, Leonardo se voltou outra vez para o problema da avaliação da força muscular humana, que o ocupara intensamente dez anos antes.[66] Mas, dessa vez, abordou o problema do ponto de vista da anatomia comparada. “Farás a anatomia das asas de um pássaro juntamente com os músculos do peito, responsáveis por seu movimento”, escreveu num lembrete a si mesmo, “e o mesmo farás em relação ao homem a fim de mostrar que este tem a possibilidade de sustentar-se nos ares pelo bater das asas”.[67]

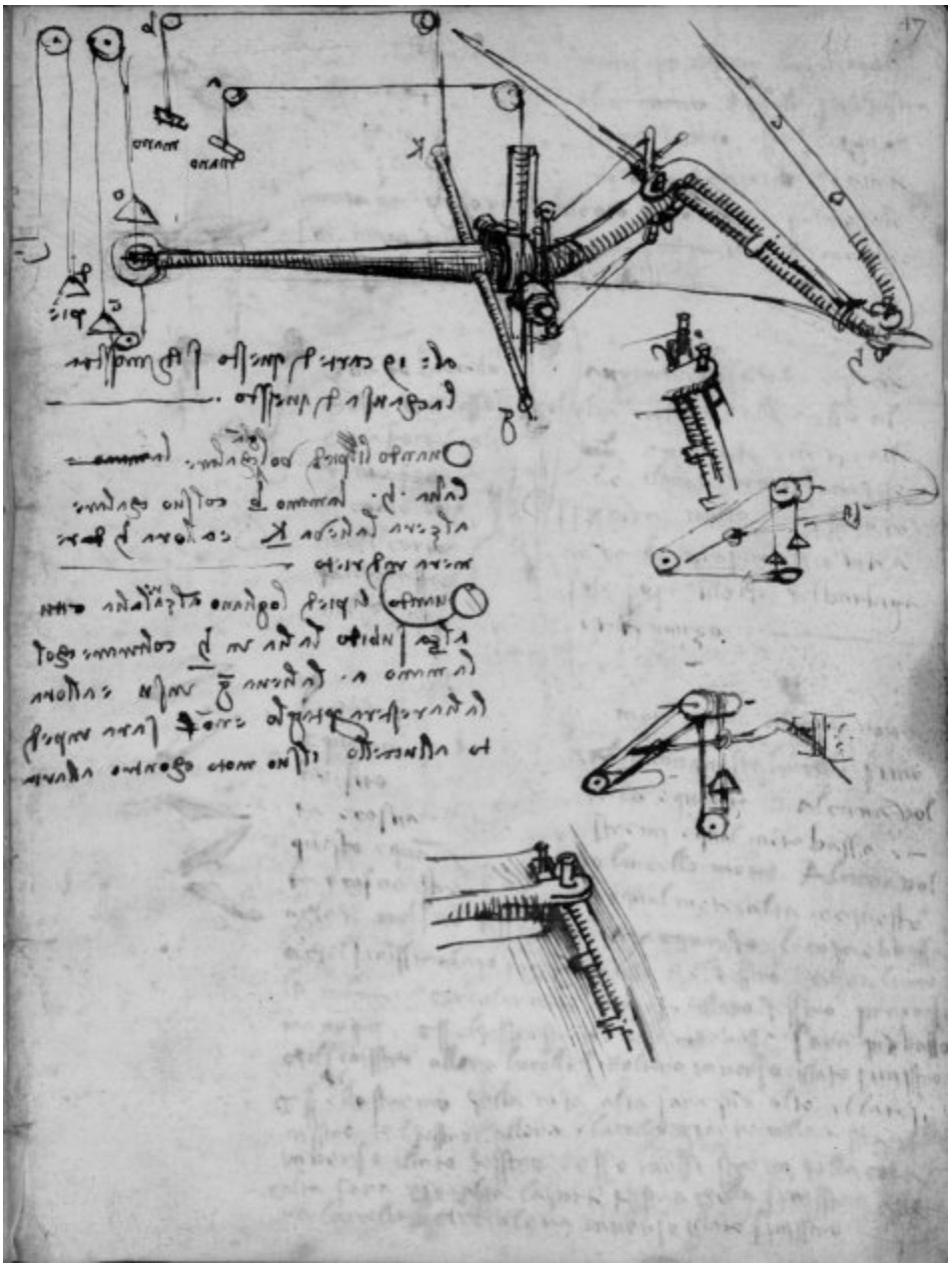


Figura 7-16: *Desenho de asa mecânica que imita o voo de asas móveis dos pássaros, Codex Sul Volo, fólio 17r.*

Leonardo empreendeu esses estudos anatômicos comparativos com vários pássaros e registrou tudo em diversos fólios do Codex Atlanticus.[68] Os resultados o convenceram de que voar batendo asas mecânicas talvez não fosse possível devido às limitações de nossa anatomia. “Os tendões e músculos da ave [são] incomparavelmente

mais fortes que os do homem", escreveu ele no Codex *Sul Volo*, "porque toda a carnação dos grandes músculos e as partes carnudas do peito facilitam e multiplicam o vigor do movimento das asas, para não falar no osso inteiriço do peito, que robustece muito a ave".[69] Esse vigor é tamanho, observa Leonardo, que permite às grandes aves de rapina sustentarem-se no ar mesmo quando carregam pesos consideráveis:

> Toda essa força existe para permitir [ao pássaro], afora a ação comum de sustentação das asas, dobrar ou triplicar seu movimento a fim de escapar do predador ou perseguir a presa. Para tanto, e para levar nas garras pelos ares um peso equivalente ao seu próprio, o pássaro precisa de fato ter duas ou três vezes mais força. Por isso vemos o falcão carregando um pato e uma águia carregando uma lebre.[70]

Contudo, Leonardo observa no mesmo trecho que os pássaros "precisam de pouca força para se manter no ar, equilibrar-se nas asas, batê-las em pleno vento e seguir caminho; para isso, um movimento quase imperceptível de asas é o bastante. Quanto maior for o pássaro, mais lento será [o movimento das asas]". Ele concluiu dessa observação que, embora a força muscular humana não fosse suficiente para erguer uma máquina voadora do chão pelo bater de asas mecânicas, uma máquina para planar ou pairar talvez fosse exequível, uma vez que exigiria muito menos força.

Para Leonardo, essa conclusão foi decisiva. Após dez anos de observações, estudos e projetos, via agora uma maneira concreta de transformar em realidade sua crença inabalável na possibilidade do voo humano. No mesmo ano em que compilou o Codex sobre o Voo dos Pássaros,

resumiu sua nova concepção numa longa e cuidadosamente redigida passagem do Codex Atlanticus:

> O pássaro [mecânico] é um aparelho que funciona de acordo com as leis matemáticas, um aparelho que, com todos os seus movimentos, o homem pode construir. Não possui, entretanto, o mesmo poder [que o pássaro natural], já que o seu só consegue movimentos de equilíbrio. Digamos então que, a esse aparelho desenhado por mãos humanas, só falta a alma do pássaro, que deve ser compensada pela alma do homem.[71]

Leonardo não ignorava que, mesmo se fosse bem-sucedido ao construir uma máquina capaz de voar como um pássaro, ela jamais igualaria completamente a capacidade instintiva que este tem de manobrar no vento e manter o equilíbrio respondendo às mudanças nas correntes de ar com movimentos sutis de suas asas e cauda. “A alma do pássaro”, prosseguiu em seu resumo, “certamente atenderá melhor às necessidades de seus membros do que o faria a alma do homem, separada deles e, sobretudo, de seus movimentos de equilíbrio quase imperceptíveis”.[72] Ainda assim, concluiu que imitar os movimentos de equilíbrio claramente perceptíveis dos pássaros bastaria para evitar a queda da máquina voadora:

> A variedade dos movimentos perceptíveis que observamos nos pássaros (...) pode ser aprendida pelo homem e (...) ele conseguirá, em grande medida, impedir a destruição do aparelho do qual é ao mesmo tempo alma e piloto.

O entusiasmo que Leonardo deve ter sentido ao chegar a essas conclusões reflete-se em sua famosa profecia:

> O formidável pássaro decolará para seu primeiro voo das costas do grande Cisne [monte Ceceri, perto de Florença], enchendo o universo de espanto, iluminando todos os escritos com sua fama e [trazendo] glória imortal ao ninho onde nasceu.[73]

Leonardo colocou essa exuberante declaração na parte interna da última capa (isto é, no começo) do Codex sobre o Voo dos Pássaros e queria-a, ao que parece, para epígrafe de seu tratado. Mas, talvez não satisfeito com o estilo, compôs uma versão mais curta na página seguinte:

> Da montanha que tem o nome da grande ave, o célebre pássaro desferirá seu voo e encherá o mundo com sua imensa fama.[74]

Convencido de que se poderia construir uma máquina capaz de imitar o voo planado e pairado dos pássaros, Leonardo usou a última parte do Codex *Sul Volo* (páginas com números baixos) para estudar como a ave, pairando, conserva seu equilíbrio no vento. Devotou, por exemplo, um fólio inteiro à análise da maneira como a ave, ao receber uma golfada lateral de vento, se equilibra abrindo ou fechando uma ou ambas as asas em vários graus, pois "as forças do vento, ferindo as duas asas, estarão na mesma proporção que suas extensões".[75] Nos fólios seguintes, Leonardo descreve em detalhe o modo como a cauda do pássaro suporta as ações de equilíbrio das asas dirigindo e controlando o voo.[76]

Essas copiosas notas sobre as ações de equilíbrio dos pássaros são seguidas, uma vez mais, por esboços que procuram imitar os movimentos naturais das aves. Agora, porém, Leonardo se concentra, não mais nas batidas, e sim nas flexões e extensões das asas, que são manobras críticas para o equilíbrio no voo planado (ver Fig. 7-8).

No Manuscrito G, composto alguns anos depois, Leonardo discute toda uma variedade de técnicas usadas

pelos pássaros para decolar, entre elas uma especialmente relevante para seus novos projetos de máquinas voadoras:

> As aves empregam um segundo método quando descem das alturas. Elas simplesmente se arremessam para diante e, ao mesmo tempo, abrem as asas para cima e para a frente; ao saltar, abaixam e recuam as asas, de sorte que, remando, prosseguem em sua descida oblíqua.[77]

É evidente que isso lembra muito a descrição das manobras de decolagem de uma asa-delta.

Em todo o Codex *Sul Volo*, Leonardo exibe imensa confiança na exequibilidade do voo humano. Às vezes, o voo mecânico parece ter se tornado uma coisa tão rotineira que ele pode enriquecer seu tratado com conselhos práticos para os "pilotos". Recomenda, por exemplo, sem nenhum laivo de ironia aparente:

> O movimento do pássaro [mecânico] deve ocorrer sempre acima das nuvens, para que as asas não fiquem úmidas. Dali, podem-se contemplar mais terras e evitar os perigos que espreitam nos desfiladeiros, pois estes são sempre varridos por lufadas e turbilhões de vento.[78]

A CIÊNCIA DOS VENTOS

Nos anos que se seguiram à conclusão do Codex *Sul Volo*, durante seu segundo período em Milão, Leonardo só raramente registrou observações sobre o voo dos pássaros; nenhum outro desenho de máquinas voadoras chegou até nós. Só oito anos depois ele voltou ao assunto. Vivia então em Roma, tinha mais de 60 anos, estava solitário e deprimido; sua re–putação como pintor fora eclipsada por rivais mais jovens como Michelangelo e Rafael.[79] Mas, a despeito desse sombrio estado de espírito, prosseguiu em seus estudos com grande diligência.

Durante os anos de 1513-1515, Leonardo coligiu seus pensamentos científicos – muitos de natureza geral, teórica – num pequeno caderno de notas hoje conhecido como Manuscrito E. É nele que está a famosa passagem sobre seu método empírico,[80] além de várias notas sobre muitos dos grandes temas que perseguiu a vida inteira: "ciência dos pesos", geometria, movimento, fluxos de água e especialmente ciência do voo.

No trecho inicial da seção sobre o voo, já citado em parte, Leonardo define o quadro teórico que convém a essa ciência:

> Uma verdadeira ciência do movimento dos pássaros no ar exige, primeiro, uma ciência dos ventos, o que proporcionaremos por meio do estudo dos movimentos da água dentro de si mesma. E essa ciência, acessível aos sentidos, servirá de escada para chegarmos ao conhecimento das coisas que voam pelos ares e em meio aos ventos.[81]

Essa passagem é notável por várias razões. Conforme já vimos, Leonardo declara aqui que sua ciência do voo se fundamenta na aerodinâmica e, de um modo mais geral, na dinâmica dos fluidos (para empregar os termos científicos modernos). A fim de se inteirar da "ciência dos ventos", explica ele, estudará os fluxos turbulentos de água ("os movimentos da água dentro de si mesma"), pois sabe, com base em demoradas observações, que os princípios do fluxo se aplicam igualmente à água e ao ar.[82] Mas, à diferença dos movimentos do ar, os da água são visíveis ("acessíveis aos sentidos") e podem, consequentemente, servir de modelo ("escada") para obter conhecimento a respeito da aerodinâmica e do voo. Aqui, de novo, encontramos um aspecto do pensamento científico de Leonardo que o coloca

séculos à frente de seu tempo – o reconhecimento do fluxo como um fenômeno universal dos líquidos e gases, bem como o uso dos primeiros como modelo para os segundos.

No Manuscrito E, muitas das notas de Leonardo sobre o voo apontam para seus estudos teóricos da "ciência dos ventos". Com efeito, a dinâmica dos fluidos não lhe saía da cabeça por essa época, inspirando tanto sua ciência quanto sua arte. Foi então que ele criou os famosos "desenhos do dilúvio" – imagens violentas e perturbadoras que representam, ao mesmo tempo, um catálogo visual de diferentes tipos de turbulência na água e no ar.[83]

Depois de definir a "ciência os ventos" como o quadro próprio para o estudo do voo dos pássaros, Leonardo passa em revista três de suas mais importantes descobertas em aerodinâmica. A primeira é o fato de o ar, ao contrário da água, ser compressível. "O ar pode ser comprimido e rarefeito quase infinitamente", anota ele, acrescentando que só pássaros grandes, com considerável envergadura de asas, conseguem voar no ar fino das altitudes elevadas.[84]

A segunda descoberta importante de Leonardo em aerodinâmica é o princípio do túnel de vento, ou seja, a relatividade do movimento entre um objeto sólido e o ar circundante. Sua formulação, no Manuscrito E, é praticamente idêntica à que dera dez anos antes no Codex Atlanticus: "Mover o ar contra o objeto imóvel é o mesmo que mover o objeto contra o ar imóvel."[85] A terceira descoberta, por fim, é a da distribuição da pressão no fluxo de ar à volta da asa do pássaro – pressão maior na superfície inferior e menor na superior – que vem descrita

corretamente, pela primeira vez, no Manuscrito E, conforme já vimos.[86]

Quando Leonardo redigiu essas notas, aparentemente já não tinha forças para rever as observações anteriores sobre o voo dos pássaros à luz da constatação posterior da distribuição de densidade em torno das asas. Todavia, sua plena compreensão da origem da sustentação aerodinâmica, juntamente com sua concisa formulação do princípio do túnel de vento, estabelece-o como um dos grandes pioneiros da aerodinâmica. De fato, no entender do engenheiro aeronáutico John Anderson, "Os conceitos aerodinâmicos [de Leonardo] eram impressionantemente avançados e constituiriam um salto quântico na aerodinâmica da época caso houvessem sido amplamente conhecidos".[87]

Os "pássaros" mecânicos de Leonardo, com asas móveis, não estavam fadados a voar, embora seus desenhos se baseassem em sólidos princípios aerodinâmicos.[88] Ainda assim os modelos construídos a partir desses desenhos, em anos recentes, são testemunhos extraordinários de seu gênio como cientista e engenheiro. Nas palavras do historiador da arte Martin Kemp:

> Utilizando sistemas mecânicos, as asas batem com muito da graça sinuosa e ameaçadora das gigantescas aves de rapina (...). Os desenhos [de Leonardo] conservam seu vigor conceitual como expressões arquetípicas do desejo humano de emular os pássaros e continuam maravilhando mesmo o público moderno, para quem a visão de toneladas de metal cruzando os ares se tornou rotineira.[89]

CAPÍTULO 8

O mistério da vida

O grande tema unificador das explorações do macrocosmo e do microcosmo, empreendidas por Leonardo, foi seu esforço persistente para compreender a natureza da vida. Ao longo dos anos, enquanto estudava, desenhava e pintava fluxos de água e ar, rochas e sedimentos da Terra, padrões de crescimento das plantas e anatomia do corpo humano, ele foi identificando corretamente diversas características biológicas fundamentais da vida.

Muito cedo, reconheceu o papel decisivo da água como o meio e o fluido nutriz da vida, a origem de todas as formas orgânicas.[1] “Ela é a expansão e o humor de todos os corpos vivos”, escreveu num de seus primeiros cadernos de notas, o Manuscrito C. “Sem ela, nada retém sua forma original”.[2] Leonardo associava a fluidez da água à natureza fluida e dinâmica das formas vivas. Sentia-se fascinado sobretudo pelos vórtices de água e outras formas de turbulência, reconhecendo-os intuitivamente, conforme demonstramos, como símbolos de vida – estáveis e, no entanto, em perpétua mutação.[3]

A natureza como um todo era viva para Leonardo. Ele vislumbrava padrões e processos similares tanto no macrocosmo da Terra viva quanto no microcosmo de um organismo individual. Considerando-se essa abordagem sistemática – compreender um fenômeno natural ligando-o a outro fenômeno por meio de uma semelhança de padrões –, não causa surpresa que Leonardo desenvolvesse uma concepção da vida profundamente ecológica. Isso é bem claro em seus manuscritos, como, por exemplo, quando ele descreve o processo contínuo de crescimento e renovação comum a todas as formas de vida na Terra:

> Penas crescem nas aves e mudam todos os anos; cabelos crescem nos animais e mudam todos os anos (...). A relva cresce nos campos, as folhas nas árvores; e, todos os anos, renovam-se por completo.[4]

Leonardo compreendeu que esses ciclos de crescimento, decadência e renovação estão vinculados aos ciclos de vida e morte dos organismos individuais:

> Nossa vida é feita pela morte de outros. Na matéria morta, persiste uma vida insensível que, reunida ao estômago das criaturas vivas, retoma a vida sensual e intelectual (...). Homens e animais são, realmente, a passagem e a condução do alimento.[5]

Com essas palavras, ele antecipou os conceitos de cadeias e ciclos alimentares que se tornariam o enfoque central dos ecologistas quatrocentos anos depois.[6] Igualmente notável, a frase “vida sensual e intelectual”, nesse trecho, mostra como muitos outros cadernos de notas que o conceito de Leonardo de vida incluía tanto a dimensão cognitiva quanto a biológica.

Leonardo reconheceu que a energia responsável pelos ciclos ecológicos de crescimento e renovação, vida e morte,

flui do sol. Em seus estudos do crescimento das plantas, ele notou: “O sol dá espírito e vida às plantas; a terra as nutre com umidade.”[7]

Enfim, Leonardo compreendeu que tanto as plantas quanto os animais precisam do ar circundante para se sustentar. No Manuscrito G, ele anotou que os ramos das árvores “absorvem o ar que os nutre”;[8] e no Codex Atlanticus, encontramos a observação:

> Onde o ar não existe na proporção certa para acomodar a chama, ne - nhuma chama pode viver, como viver não pode nenhum animal terrestre ou ave (...). E onde não vive a chama, não vive o animal que respira.[9]

O papel crítico da água como matriz e fluido nutritivo dos tecidos vivos, o papel do ar na sustentação da vida (ou seu oxigênio, como sabemos hoje), a renovação e o crescimento contínuos das formas orgânicas, os ciclos de vida e morte no mundo natural e a força vital oriunda do sol eram as características básicas da vida que Leonardo observou e analisou. Ele explorou tudo isso no macrocosmo em seus estudos de dinâmica dos fluidos, geologia e botânica; e, mais tarde, começou a examinar os mesmos padrões e processos no microcosmo do corpo humano, reconhecendo esses fenômenos como componentes de um sistema de processos metabólicos que hoje a ciência considera características fundamentais da vida biológica.

Em suas investigações da natureza e origem da vida no corpo humano, Leonardo se concentrou em três processos interdependentes. O primeiro era a geração e o transporte dos “espíritos vitais” do corpo que, segundo os filósofos antigos, nascem de uma mistura de sangue e ar (identificada na moderna bioquímica como sangue

oxigenado). O segundo processo era o fluxo e refluxo do ar nos pulmões. E o terceiro, a digestão do alimento e o transporte, pelo sangue, dos nutrientes para os tecidos do corpo.

Leonardo percebeu que esses processos interdependentes eram essenciais para o sustento da vida. Percebeu também que, no centro deles, estava o coração – e alimentou a esperança de que pesquisas minuciosas da natureza e funções desse órgão misterioso o aproximassem mais da compreensão do mistério da vida.

O CORAÇÃO HUMANO

Ao longo das idades, o coração tem sido o órgão usado como símbolo maior da existência humana e da vida emocional. Nós, metaforicamente, o associamos a inúmeras emoções. Nós “trazemos alguém no coração” (amor) e dizemos que uma pessoa “tem bom coração” (compaixão); entregamo-nos a uma tarefa “de todo o coração” (dedicação); agradecemos a alguém “do fundo do coração” (sinceridade); e tomamos decisões “de coração leve” ou “com o coração partido” (profundidade emocional).

Na época de Leonardo, as associações do coração humano com a vida, a consciência e as emoções eram bem mais que metáforas. Da Antiguidade à Idade Média, o coração foi considerado um órgão especial, que gerava os espíritos vitais (um misterioso “vapor cardíaco”) do corpo, sendo também a fonte do calor corporal.[10] Para Aristóteles (que não conhecia o sistema nervoso central), o coração era não apenas o centro de vitalidade do corpo como a própria

sede da alma, ou seja, da inteligência, movimento e sensação. Galeno, a maior autoridade médica da Antiguidade, enfatizava a “natureza nobre” do coração e garantia que, embora ele parecesse um músculo, na verdade era coisa bem diversa. O coração fazia os espíritos vitais circular pelo corpo juntamente com o “calor inato”; sua expansão e contração eram, para Galeno, sinais de sua função como órgão inteligente. Avicena, o grande médico e filósofo, tentando integrar a anatomia de Aristóteles com a fisiologia de Galeno, via o coração como o principal órgão do corpo, mas salientava que, sendo inteligente, podia delegar certas funções a outros órgãos, sobretudo o cérebro.

A principal autoridade médica de Leonardo era Mondino, por intermédio do qual conheceu as obras de Galeno e Avicena.[11] Aceitou muitos de seus conceitos, mas prontamente descartou-os quando suas próprias observações lhe mostraram outra realidade. Face à assustadora barafunda de ideias sobre o coração, herdada da Antiguidade, Leonardo se concentrou no que considerava os “problemas gêmeos”: como as ações do coração mantêm o sangue na temperatura do corpo e como geram os espíritos vitais que nos conservam vivos. Adotou a antiga noção de que esses vapores responsáveis pela vida brotam de uma mistura de sangue e ar – o que é essencialmente correto, se a identificarmos com o sangue oxigenado – e desenvolveu uma engenhosa teoria para resolver ambos os problemas.

Como fazia muitas vezes em suas investigações científicas, Leonardo elaborou vários modelos teóricos para

explicar a geração do calor corporal, rejeitando-os um por um quando os julgava insatisfatórios. A primeira tentativa surgiu da comparação do fluxo de sangue com o fluxo de água nas “veias” do interior da Terra e com o fluxo da seiva nas plantas. Conforme vimos, Leonardo presumiu que esses três processos dependiam da mesma força externa – o calor do sol, doador de vida.[12]

O sol, pensava Leonardo, levanta os “humores” (fluidos vitais) dentro dos três corpos: a água que nutre a vegetação da Terra, a seiva que nutre os tecidos das plantas e o sangue que nutre os tecidos do corpo humano. Chegados ao local onde esfriam e se condensam, os fluidos descem novamente e são de novo levantados, num processo de circulação contínua. Depois de alguns anos, Leonardo concluiu que sua analogia entre os vasos sanguíneos dentro do corpo humano e as veias de água dentro da Terra era limitada demais e, por fim, alcançou a plena compreensão do ciclo da água.[13] Relativamente ao movimento do sangue, passou a desenvolver um segundo modelo, no qual o coração agia como um forno que abrigava um fogo central.

A ideia de uma “lareira” cardíaca que gera o calor inato do coração já fora proposta por Aristóteles. Leonardo vinculou-a ao modelo correspondente do ciclo da água, em que esta, pelo que se supunha, era levada a cavernas especiais dentro da Terra num processo de destilação alimentado pelo calor interno do planeta.[14]

No Codex Atlanticus, Leonardo fez um pequeno esboço onde o coração aparece como uma espécie de fornalha dotada de valvas de entrada e saída para chaminés separadas, que representam os pulmões. Numa folha da

Coleção Windsor, ele desenhou um coração de duas câmaras com passagens que as ligam aos pulmões, numa clara analogia com seu modelo do forno.[15]

Entretanto, Leonardo logo ficou insatisfeito com a visão do coração como um simples forno que abriga as chamas do calor corporal. Depois de proceder a dissecções mais minuciosas das várias partes do coração, ele constatou suas funções no controle do fluxo do sangue. Pôs-se então a elaborar o terceiro, e bem mais sofisticado, modelo do coração, recorrendo a seu conhecimento dos fluxos turbulentos de água e ar, bem como do papel do atrito, para explicar a origem tanto da mistura sangue-ar dos espíritos vitais quanto da temperatura corporal. Embora esse modelo apresente sérias falhas do ponto de vista da moderna cardiologia, inclui meticulosas e acuradas descrições e desenhos de inúmeros aspectos sutis da estrutura e funções do coração e do fluxo de sangue – realizações pioneiras no campo da anatomia humana.

Para bem avaliar a importância da anatomia cardíaca de Leonardo, convém passarmos brevemente em revista a moderna compreensão da anatomia e fisiologia do coração e da circulação sanguínea. O coração humano é uma estrutura em forma de pera, constituída de tecidos musculares especiais e abrigada num invólucro membranoso. Uma parede de músculo (o septo) divide o coração em duas cavidades, cada qual constituída por uma câmara superior (átrio) e uma câmara inferior (ventrículo), conforme se vê na Figura 8-1.

Dois tipos de vasos sanguíneos conectam as quatro câmaras: as artérias, que retiram o sangue do coração, e as

veias, que o trazem de volta. O principal vaso arterial, a aorta, se subdivide em arteríolas, as quais, por sua vez, se ramificam em capilares que levam o sangue a todas as partes do corpo. Dentro dos tecidos do corpo, nesses capilares microscópicos, ocorrem as trocas de gases e nutrientes.

Feitas as trocas, o sangue converge dos capilares para uma rede de veias minúsculas e estas se transformam em veias maiores que vão ter à veia cava, a principal veia do corpo. A veia cava inferior é suprida por veias que vêm das pernas, do fígado e dos rins. A veia cava superior recebe sangue da cabeça e do pescoço.

Para impedir o refluxo do sangue, o coração é equipado com uma série de valvas que se abrem em várias direções: a valva tricúspide, entre o átrio direito e o ventrículo direito; a valva mitral, entre o átrio esquerdo e o ventrículo esquerdo; e diversas valvas semilunares, na aorta e na artéria pulmonar. Durante o ciclo cardíaco, essas valvas se abrem e fecham num ritmo preciso.

O sistema da circulação do sangue consiste de duas partes distintas. A circulação sistêmica serve o corpo inteiro, exceto os pulmões, enquanto a circulação pulmonar serve os pulmões. Na circulação sistêmica, o sangue oxigenado que vem dos pulmões entra no átrio esquerdo por dois pares de veias pulmonares (um par de cada pulmão). Uma vez cheio, o átrio se contrai, enviando o sangue para o ventrículo esquerdo. Uma grande percentagem de sangue também entra no ventrículo passivamente, sem contração atrial.

O forte ventrículo esquerdo se contrai então, forçando o sangue, sob grande pressão, para dentro do arco aórtico e a aorta. Três grandes ar - térias se originam do arco aórtico, suprindo de sangue a cabeça, o pescoço e os braços. Outras grandes artérias originárias da aorta mandam sangue para os rins, o baço e o fígado, bem como para as coxas e pernas. Na periferia do corpo, o oxigênio e os nutrientes se espalham pelas células dos tecidos, ao passo que o CO_2 e diversos detritos metabólicos tomam a direção oposta, passando das células para os capilares e daí voltando ao coração, pelas veias. Nesse trajeto da circulação sistêmica, parte do sangue atravessa o intestino delgado, onde absorve nutrientes do alimento digerido, e se dirige para o fígado a fim de completar a digestão e regular diversas substâncias de que o corpo necessita. Outra porção de sangue atravessa os rins, onde os detritos metabólicos são filtrados.

Ao final da circulação sistêmica, o sangue, agora com baixo teor de oxigênio e saturado de CO_2, dá início à circulação pulmonar penetrando no átrio direito, de onde passa sob pressão para o ventrículo direito. Este então se contrai, forçando o sangue para dentro dos pulmões através das artérias pulmonares. Nos pulmões, o sangue pobre em oxigênio e rico em CO_2 flui por uma vasta rede de capilares que rodeiam os minúsculos sacos alveolares. O oxigênio do ar inalado se difunde pelas membranas capilares até o sangue, onde se fixa nas moléculas de hemoglobina das hemácias, enquanto o CO_2 parte na direção oposta a fim de ser expelido. O sangue oxigenado volta ao coração pelas

veias pulmonares, penetrando no átrio esquerdo para completar o ciclo.

Além disso, existe o sistema separado dos chamados vasos coronarianos, que nutrem os tecidos musculares do próprio coração (não visto na Fig. 8-1). Duas artérias coronárias se originam da base da aorta e levam sangue rico em oxigênio a todos os tecidos do coração por intermédio de um delicado sistema de vasos ramificados. Um sistema correspondente de veias coronárias coleta o sangue pobre em oxigênio e envia-o ao átrio direito.

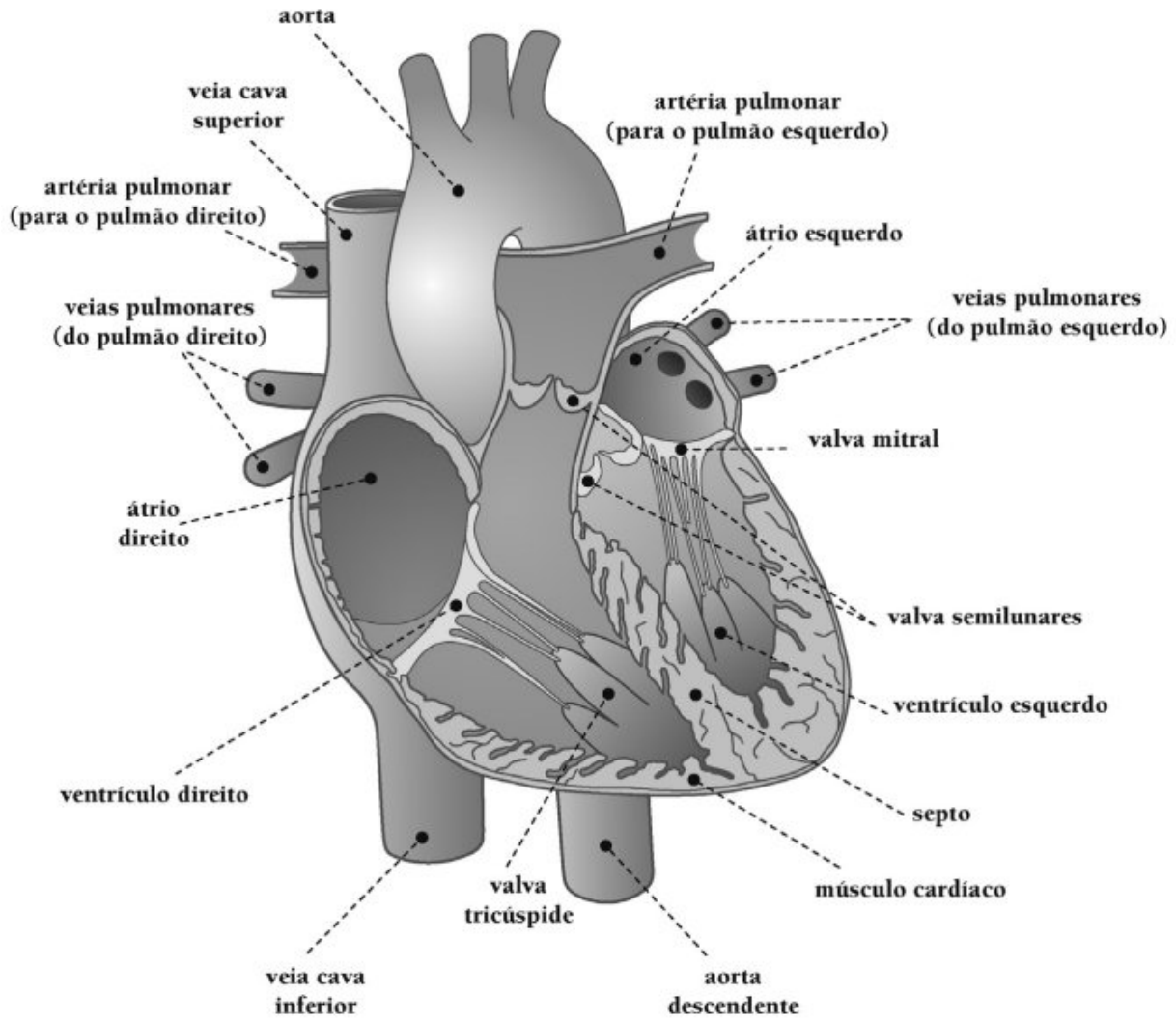


Figura 8-1: *O coração humano com seus vasos sanguíneos e valvas.*

A circulação do sangue é perfeitamente sincronizada com o ciclo cardíaco (as batidas do coração), que consiste de três fases. Na primeira, os dois átrios se contraem em simetria, esvaziando seus conteúdos nos ventrículos. Uma fração de segundo depois, os dois ventrículos se contraem ao mesmo tempo, forçando o sangue para as artérias que saem do coração. Durante as fortes contrações ventriculares, conhecidas como sístoles, as valvas tricúspide e mitral se fecham, produzindo o conhecido som de “lub” que é a primeira parte da batida cardíaca. Os átrios e ventrículos então se relaxam por um breve tempo, antes que o ciclo se repita. No início da fase de relaxamento, conhecida como diástole, as valvas aórtica e pulmonar (valvas semilunares) se fecham, produzindo o som de “dub” característico, que é a segunda parte da batida cardíaca. Durante a diástole, o sangue enche os átrios e começa a fluir passivamente para dentro dos ventrículos. Ambos os lados do coração se contraem, esvaziam, relaxam e enchem simultaneamente. Assim, só são sentidas uma sístole e uma diástole.

Note-se que, na circulação pulmonar, as artérias transportam sangue pobre em oxigênio (do coração) e as veias transportam sangue rico em oxigênio (para o coração), enquanto, na circulação sistêmica, o sangue oxigenado é conduzido pelas artérias e o sangue sem oxigênio, pelas veias. A circulação pulmonar se cruza com o ciclo respiratório nos pulmões; a circulação sistêmica, com os processos de digestão e excreção no trato gastrointestinal, fígado e rins.

O CORAÇÃO E O FLUXO DE SANGUE SEGUNDO GALENO

O que Leonardo lia sobre a estrutura do coração e o fluxo de sangue nos textos clássicos era muito diferente da visão atual.[16] Galeno concebia o coração antes de tudo como um órgão respiratório, feito de uma substância especial e dotado de propriedades únicas. Por meio de processos misteriosos, o coração produzia tanto o calor inato do corpo quanto a força da vida ou "espíritos vitais", sendo sua função mais importante extrair ar frio dos pulmões e conduzi-lo ao ventrículo esquerdo, onde o calor corporal era gerado e onde ele era impedido de se aquecer em excesso.

Essa concepção do coração, que tão estranha nos parece hoje, derivava do fato de Galeno basear toda a sua fisiologia do corpo humano na ideia tradicional da alma como sopro vital (*pneuma*) sob a forma de vários "espíritos" distintos, vistos como os motores primários de todas as funções orgânicas.[17]

Galeno postulava três dessas forças responsáveis pela vida. Os espíritos "naturais" eram criados pelo fígado. Transformavam o alimento digerido em sangue e distribuíam-no pelas veias. Os espíritos "vitais" eram produzidos pelo coração a partir de uma quantidade de ar tirada dos pulmões e distribuídos pelas artérias. Finalmente, os espíritos "animais", as forças motrizes do corpo, originavam-se no cérebro e chegavam aos músculos por intermédio de nervos ocos.

Galeno só reconhecia duas câmaras no coração (os ventrículos), vendo os átrios apenas como terminais das veias cavas e das veias pulmonares. Chegou a mencionar as

valvas cardíacas, mas chamou-as de “orifícios” e ignorou suas funções. Galeno adotou a postura dos antigos filósofos gregos, que consideravam as artérias e veias dois sistemas completamente distintos, o primeiro encarregado de conduzir os espíritos vitais (isto é, sobretudo ar), produzidos no ventrículo esquerdo, e o segundo encarregado de transportar o sangue, produzido pelo fígado. No entanto, Galeno sustentava que as artérias também continham algum sangue, que passava do ventrículo direito para o esquerdo através de minúsculos poros do septo.

As ideias de Galeno sobre o movimento do sangue eram um tanto confusas. Para ele, o sangue era feito no fígado a partir do alimento e levava nutrientes para os tecidos do corpo através das veias (ou seja, indo na direção oposta do verdadeiro fluxo de sangue nas veias). Um pouco desse sangue, atraído pelo ventrículo direito ao dilatar-se, era ali “sutilizado” (isto é, ficava mais fino e leve). Quando o ventrículo direito se contraía, parte desse sangue sutil atravessava o septo em direção ao ventrículo esquerdo e o restante ia para os pulmões através da artéria pulmonar, de onde era expelido juntamente com o ar. No ventrículo esquerdo, o sangue sutil se combinava com o ar retirado dos pulmões e formava os espíritos vitais, em seguida levados aos tecidos do corpo pelo sistema de artérias.

Contudo, na teoria de Galeno, a distribuição dos espíritos vitais pelas artérias, bem como a do sangue pelas veias, não era feita por circulação e sim por flutuações semelhantes ao fluxo e refluxo do ar nos pulmões e na traqueia. Essa deve ter sido uma conclusão natural para ele,

pois via o coração como um órgão respiratório e ignorava as funções das valvas cardíacas.

A ANATOMIA DO CORAÇÃO, SEGUNDO LEONARDO

Os sofisticados estudos de Leonardo sobre os movimentos do coração e do sangue, feitos em Milão e Roma quando ele estava perto dos 60 anos, constituem o ápice de sua obra anatômica. Além de entender e desenhar o coração como ninguém antes, observou sutilezas de suas ações no fluxo do sangue que escapariam aos pesquisadores médicos durante séculos.

Leonardo ilustrou suas descobertas numa série de desenhos impressionantes, hoje na Coleção Windsor. Um dos mais notáveis é também um dos últimos que fez na área anatômica, datando de 1513. Numa magnífica folha dupla, vemos o coração de um boi a partir de várias perspectivas (Gravura 9). O principal objetivo de Leonardo, nesse es - tudo, foi mostrar os vasos coronarianos.[18] Nas duas figuras à esquerda da página, as artérias coronárias saem da base da aorta e se dividem em vários ramos. A artéria pulmonar foi eliminada para que apareçam as raízes da aorta e da veia cava. As três cúspides da valva pulmonar são claramente visíveis no orifício criado pelo corte da artéria.

As duas figuras no alto, à direita, mostram veias coronárias e artérias. Vale notar a beleza com que são reproduzidos os delicados padrões de ramificação, que se entrecruzam repetidamente. Os pequenos esboços no

centro da margem direita ilustram como os vasos coronarianos “coroam” o coração, o que explica seu nome moderno. Embaixo deles, no canto inferior direito, Leonardo desenhou a valva pulmonar e a valva tricúspide de cima, mostrando a última fechada e aberta. A folha toda é um testemunho contundente da compreensão de Leonardo de inúmeros traços sutis da anatomia cardíaca.

A parte principal dos complexos estudos anatômicos do coração, feitos por Leonardo, data dos anos 1511-1513. No início desse período, ele registrou duas grandes descobertas num caderno de bolso relativamente volumoso hoje conhecido como Manuscrito G. A primeira foi a de que o coração, ao contrário do que dizia Galeno, é um músculo; a segunda, a de que esse órgão possui quatro cavidades e não duas, como todas as antigas autoridades médicas acreditavam.

Já no primeiro fólio do Manuscrito G, junto a vários esboços de um coração dissecado, Leonardo declara categoricamente: “O coração é o principal músculo de força, bem mais poderoso que os outros músculos.”[19] Depois de estudar os textos médicos clássicos, onde se afirmava que o coração era feito de uma substância especial dotada de propriedades misteriosas, e desenvolver vários modelos teóricos que não conseguiram explicar essas propriedades, constatar que o coração era um músculo representou para Leonardo uma grande ruptura. Como já estudara profundamente a natureza e as ações dos músculos, compreendeu que o coração, como qualquer outro músculo, precisava ser nutrido por vasos sanguíneos especiais e que suas ações tinham de ser provocadas por nervos

igualmente especiais. “O coração não é, por si só, o começo da vida”, anotou nos Estudos Anatômicos, “mas um vaso feito de músculo denso, vivificado e nutrido por veias e artérias como os outros músculos”.[20]

Nos anos seguintes, Leonardo investigou minuciosamente os trajetos e ramificações das artérias e veias coronárias, resumindo os resultados dessas investigações numa estranha folha dupla da Coleção Windsor (Gravura 9). Ao mesmo tempo, procurou os nervos que estimulam o músculo cardíaco e localizou-os corretamente na grande rede conhecida hoje como “nervos vagos”.[21] Leonardo chamou-os de “nervos reversos”, provavelmente porque mudam com frequência de direção, e numa nota para si mesmo enfatizou a importância de estudá-los:

> Acompanhar os nervos reversos até o coração para descobrir se eles dão movimento ao coração ou se este se move sozinho. Caso tal movimento ocorra em virtude dos nervos reversos, que nascem no cérebro, ficará claro que a alma tem sua sede nos ventrículos cerebrais.[22]

É evidente, por essa passagem, que Leonardo atribuiu corretamente os movimentos internos e externos do corpo aos nervos motores, localizando sua origem no cérebro.

De fato, tal como representou a anatomia dos músculos, tendões e ossos levando em conta seus movimentos, ele desenhou o coração em movimento desde o início de suas pesquisas. Os esboços no Manuscrito G ainda são bastante imperfeitos, mas o coração já é mostrado em ação, com as câmaras se contraindo e dilatando.

O fato de o coração ter quatro cavidades e não duas foi a segunda grande descoberta inicial de Leonardo na área da anatomia cardíaca. Deu aos átrios o nome de “aurículas do coração” – termo ainda usado – e identificou acertadamente seu papel como “as antecâmaras do coração”.[23] Leonardo tinha plena consciência da importância dessa descoberta, por isso enfatizou-a em diversas passagens de seus Estudos Anatômicos.

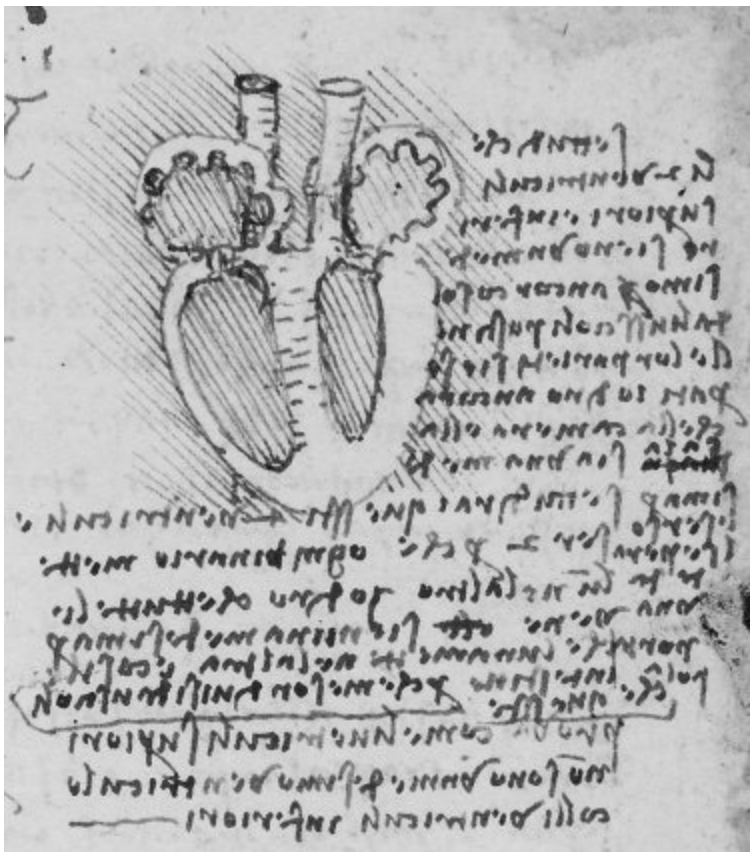


Figura 8-2: *As quatro câmaras do coração, c. 1511, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 155r.*

Logo depois dos primeiros esboços no Manuscrito G, ele produziu um desenho mais elaborado (Fig. 8-2), no qual os átrios são claramente distinguidos dos ventrículos. Na legenda, oferece uma descrição sucinta:

> O coração tem quatro ventrículos, dois mais embaixo em sua substância e dois mais em cima, fora de sua substância. Dois se situam à direita e dois à esquerda; os dois da direita são bem maiores que os dois da esquerda. Os ventrículos superiores são separados dos inferiores por uma espécie de portinholas ou portões do coração.[24]

Em outro fólio, composto cerca de dois anos depois, ele registra uma versão mais curta dessa informação: “O coração tem quatro ventrículos. Os dois superiores são chamados aurículas do coração, os dois inferiores são conhecidos como ventrículos direito e esquerdo.”[25]

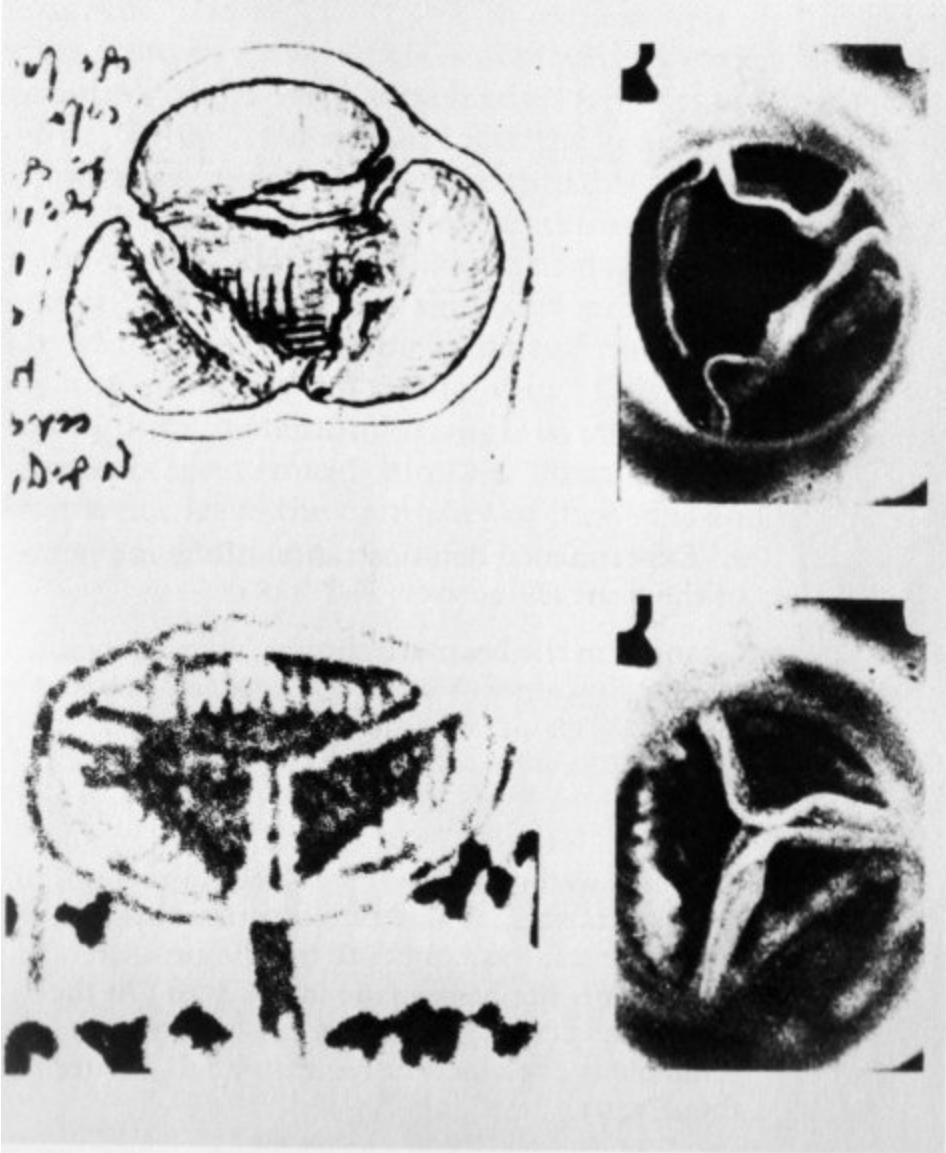


Figura 8-3: *Cúspides da valva aórtica, abertas e fechadas, tais quais aparecem nos desenhos de Leonardo (a) e em moderna fotografia de alta velocidade (b); extraído de Keele (1983), p. 319.*

Leonardo compreendeu perfeitamente o funcionamento das valvas cardíacas e demonstrou com impressionante exatidão suas formas nas diversas etapas de abertura e fechamento.[26] A característica abertura em H da valva mitral e os fechamentos em Y das outras três valvas são claramente visíveis em vários desenhos dos orifícios cardíacos. A valva tricúspide, em particular, é explorada nos

mínimos detalhes, tanto em termos de estrutura quanto de movimento.[27]

Kenneth Keele, historiador da medicina e especialista em Leonardo, justapôs dois desenhos de Leonardo da valva aórtica aberta e fechada a duas imagens modernas da mesma valva, que ele próprio obteve por meio da fotografia de alta velocidade (Fig. 8-3). O resultado é assombroso. A forma triangular do orifício entre as cúspides abertas, as bordas onduladas das cúspides e os detalhes da valva fechada, desenhados por Leonardo há quinhentos anos, são praticamente idênticos aos traços anatômicos que aparecem nas fotografias modernas.

Além de mostrar as formas exatas das valvas tricúspide e mitral em várias posições, Leonardo, dissecando os chamados músculos papilares, revelou como contribuem para controlar as ações dessas valvas por meio de tendões fibrosos, conhecidos hoje como *chordae tendineae* (“cordas fibrosas”). Leonardo mostra nos mínimos detalhes o modo como essas fibras se prendem às cúspides das valvas. Somente nos séculos XVIII e XIX é que os músculos papilares e seus tendões voltaram a ser estudados com tamanha meticulosidade.[28]

As representações precisas que Leonardo fez de diversas estruturas anatômicas delicadas do coração nada ficavam a dever às suas acuradas descrições de diversas funções cardiovasculares. Ele descreveu exatamente a origem da pulsação como contrações rítmicas das artérias, que ajudam o coração a bombear o sangue e a manter constante o fluxo para os vasos menores. Reconheceu

claramente a conexão entre pulsação e batimentos cardíacos:

> Os batimentos do coração (...) geram uma onda de sangue ao longo de todos os vasos, que constantemente se dilatam e contraem (...). Isso sabemos pela pulsação quando tocamos esses vasos com os dedos em qualquer parte do corpo vivo.[29]

Leonardo foi também o primeiro a perceber que o coração se encurta na sístole (contração) e se alonga na diástole (dilatação), contradizendo assim os tradicionais ensinamentos de Galeno (isso foi confirmado 120 anos depois pelo médico William Harvey). Mais notável ainda, Leonardo oferece a primeira interpretação correta do impulso cardíaco contra a parede do peito:

> O tempo da contração do coração e da percussão de seu ápice contra a caixa torácica, dos batimentos do pulso e da entrada do sangue no portão fronteiro do coração [o orifício da aorta] é um só.[30]

A descoberta de que a contração dos ventrículos, o choque da ponta do coração contra a parede do peito, a pulsação e a ejeção de sangue na aorta ocorrem ao mesmo tempo deve ser considerada uma das maiores de Leonardo na anatomia do coração. Nenhum de seus predecessores ou contemporâneos sabia que esses fenômenos são inter-relacionados. De novo, foi Harvey quem redescobriu suas conexões mais de um século depois.

"FLUXO E REFLUXO" DO SANGUE

Considerando-se as acuradas demonstrações visuais e descrições verbais que Leonardo fez de tantos aspectos sutis do sistema cardiovascular, é difícil acreditar que, ao

contrário de William Harvey, ele não tenha reconhecido a circulação do sangue. No entanto, foi o que ocorreu. Mas como Leonardo deixou de reconhecê-la e Harvey, não? Esses dois cientistas brilhantes partiram da mesma premissa, os textos clássicos de Galeno e Avicena; ambos enfrentaram os mesmos problemas antes do desenvolvimento da química e o aperfeiçoamento do microscópio. De fato, comparar a anatomia e a fisiologia cardíaca de Leonardo com as de Harvey é tão esclarecedor quanto comparar sua mecânica com a de Galileu,[31] contemporâneo de Harvey.

Uma diferença crítica entre a pesquisa cardíaca de Leonardo e a de Harvey é que Leonardo não se dispôs a realizar vivissecções e, assim, nunca viu o fluxo de sangue pelo coração e seus vasos. Escreveu sobre uma visita a um abatedouro na Toscana, onde observou a morte de porcos e tirou conclusões do modo como o sangue esguichava das feridas, mas fazer vivissecções era algo repugnante demais para ele. Harvey, ao contrário, retalhava cães e porcos aparentemente sem repugnância alguma, para observar e tocar seus corações “enfraquecidos” quando os animais morriam.[32] Em seus relatos sobre esses experimentos, que soam bastante cruéis hoje em dia, Harvey explicou calmamente e sem poupar detalhes repulsivos como obteve evidência direta sobre vários aspectos dos movimentos do coração.

Entretanto, creio que Leonardo poderia ter reconhecido a circulação do sangue mesmo sem a evidência direta da vivissecção. O que, principalmente, o impediu de fazer isso foi a maneira como enquadrou o problema todo da fisiologia

cardíaca. De suas leituras dos textos clássicos, ele extraiu duas questões centrais: de que modo o coração gera o calor corporal, característico de todos os mamíferos, e de que modo mantém a força da vida, os “espíritos vitais” que animam os tecidos do corpo? Leonardo recorreu à sua sofisticada compreensão dos fluxos turbulentos e da fricção para elaborar um modelo brilhante, mas errôneo, do fluxo do sangue, modelo que envolvia correntes contínuas indo e vindo entre os átrios e ventrículos do coração, produzindo com isso tanto o calor inato do corpo quanto os espíritos vitais.

As notáveis descobertas de Leonardo em anatomia cardíaca levaram-no muito além das visões de Galeno, que então prevaleciam. Constatou que o coração é um músculo com todas as características da contração muscular; identificou nele quatro câmaras e não duas; e enfatizou que seu movimento ativo é a contração na sístole, responsável por expelir o sangue dos ventrículos para os vasos principais, e não a expansão na diástole, que puxa o ar dos pulmões para o coração, conforme sustentava Galeno. Leonardo, com efeito, chegou a refutar essa visão galênica inflando os pulmões de um boi morto e mostrando que nenhum ar entrava na veia pulmonar.[33]

A despeito de todos esses avanços, Leonardo continuou preso à ideia galênica de que o sangue se move em paralelo por dois sistemas vasculares separados e de que esse movimento é de fluxo e refluxo – do coração para a periferia do corpo e da periferia do corpo para o coração –, ao longo tanto das artérias quanto das veias. Não há sugestão alguma, nos manuscritos de Leonardo, de que o sangue se

move através dos tecidos das artérias para as veias e, portanto, nenhuma pista de que ele houvesse compreendido a circulação.

Leonardo reteve a concepção galênica do fluxo e refluxo do sangue por vários motivos. Ela não contrariava nenhuma de suas observações e parecia consistente com seus aprofundados estudos da respiração – o fluxo e refluxo do ar pela traqueia e os pulmões.[34] Leonardo via o fluxo e refluxo do sangue como outra manifestação dos movimentos cíclicos tão característicos da fisiologia humana.

Mais importante ainda, talvez, era o fato de Leonardo postular um movimento cíclico do sangue dentro do coração para explicar a origem do calor corporal. Quando os átrios e ventrículos se contraem e dilatam em sincronia, o sangue vai e vem entre eles e, pelo atrito nesse “fluxo e refluxo”, é aquecido e “sutilizado”.

Esse modelo hidrodinâmico representou o próprio núcleo de sua anatomia cardíaca e era totalmente consistente com a ideia de movimento cíclico do sangue pelo corpo. Penso que essa foi a razão principal pela qual Leonardo, apesar de todas as suas habilidosas dissecções anatômicas e seus grandes poderes de observação, não logrou reconhecer a circulação do sangue.

Quando descobriu os átrios, teve imediatamente a ideia de explicar o calor corporal como produto do atrito do sangue em trânsito pelas quatro câmaras do coração. Seu vasto conhecimento dos fluxos turbulentos permitiu-lhe pintar pequenos vórtices com grande precisão e descrever seu movimento com grande exatidão. No mesmo fólio dos Estudos Anatômicos que mostra seu primeiro desenho claro

dos átrios e ventrículos (Fig. 8-2), Leonardo fornece uma descrição detalhada de seu modelo hidrodinâmico de geração de calor:

> Os ventrículos superiores provocam continuamente um fluxo e refluxo do sangue, que é constantemente puxado pelos ventrículos inferiores dos ventrículos superiores ou pressionado para dentro deles (...). Assim, graças a esse fluxo e refluxo muito rápido, o sangue é aquecido e sutilizado – e fica tão quente que, não fosse a ajuda dos foles chamados pulmões (os quais, dilatando-se, absorvem ar fresco e colocam-no em contato com os revestimentos das ramificações dos vasos, refrescando-os), sufocaria o coração e o privaria de vida.[35]

Aqui, Leonardo tenta oferecer uma explicação científica para o calor corporal, que era visto por Galeno como uma propriedade inata e um tanto misteriosa do coração. Ele sabe que os princípios do fluxo são os mesmos tanto para o sangue quanto para qualquer outro líquido,[36] que a fricção sempre gera calor[37] e que os líquidos se expandem (se "sutilizam") quando se aquecem – e reúne essas observações de diferentes áreas da mecânica num modelo teórico coerente (embora incorreto).

Hoje, sabemos que o calor corporal dos mamíferos é resultado de miríades de reações bioquímicas nos tecidos do corpo e que a temperatura deste é controlada por um centro regulador localizado no cérebro. Leonardo, vivendo mais de trezentos anos antes do desenvolvimento da bioquímica, não poderia conceber semelhante explicação. Presumiu erroneamente que o calor era gerado pelo torvelinho do sangue no coração, mas estava certo ao declarar que o sangue é essencial para distribuir o calor pelo corpo e manter nele uma temperatura uniforme. Fato curioso, William Harvey não tentou explicar a origem do

calor do corpo, apenas concluiu, sem descer a maiores detalhes, que ele era gerado pelo coração.[38]

A descrição feita por Leonardo do papel dos pulmões no trecho citado acima é verdadeiramente intrigante. Ele aceita a visão galênica de que a função dos pulmões consiste em esfriar o sangue, mas contradiz Galeno ao afirmar corretamente que nenhum ar passa dos pulmões para o coração. Portanto, conclui Leonardo, o esfriamento do sangue ocorre quando o ar nos pulmões entra em contato com "os revestimentos das ramificações dos vasos". Essa é uma descrição notavelmente exata das trocas entre os sacos alveolares e a rede de vasos sanguíneos que os envolve – embora o que se troque, no entender de Leonardo, não seja oxigênio, mas apenas calor.

No fólio seguinte, Leonardo continua a discutir o calor do corpo com uma descrição pormenorizada dos fluxos turbulentos do sangue no coração:

> Assim, indo para cima e para baixo, ele nunca deixa de fluir pelos recessos cavernosos interpostos entre os músculos que contraem o ventrículo superior. O giro do sangue sob a forma de redemoinhos, o atrito provocado nas paredes e as percussões nas cavidades são a causa de seu aquecimento. Dessa forma, de espesso e viscoso que era, o sangue se torna sutil e fluido, podendo então passar do ventrículo direito para o esquerdo através das minúsculas porosidades da parede interposta entre o ventrículo direito e o inferior esquerdo.[39]

Além de gerar a temperatura corporal, o aquecimento do sangue presta-se a mais dois propósitos, segundo Leonardo. No lado direito do coração, conforme ele explica no trecho acima, o sangue "espesso e viscoso" se torna "sutil e fluido" para poder passar do ventrículo esquerdo através dos poros invisíveis do septo postulados por Galeno.

Harvey, ao contrário de Leonardo, rejeitou a concepção galênica desses poros, afirmando corretamente que o sangue se move do ventrículo direito para o esquerdo graças à circulação pulmonar. No entanto, Harvey nunca ficou satisfeito com esse argumento, pois substituiu a ideia do sangue atravessando poros invisíveis no septo pela de sua passagem por capilares igualmente invisíveis nos pulmões.[40]

OS ESPÍRITOS VITAIS

A fisiologia de Galeno do corpo humano, como vimos, baseava-se em três tipos de forças geradoras de vida, ou "espíritos", considerados manifestações diferentes do mesmo sopro vital (*pneuma*) e agentes primários de todas as funções corporais.[41] Leonardo, com sua abordagem estritamente empírica do conhecimento científico, que rejeitava quaisquer noções de forças sobrenaturais,[42] eliminou dois dos espíritos galênicos de sua concepção da fisiologia humana. Questionou a antiga ideia de espíritos animais que transitariam por nervos ocos como uma espécie de "vento psíquico" e substituiu-a pelo conceito bem mais sofisticado de impulsos nervosos imateriais que percorrem os nervos sensoriais e motores sob a forma de ondas.[43] Também rejeitou a noção galênica de espíritos naturais, os agentes da digestão, como entidades não existentes para as quais não encontrara nenhuma evidência.[44]

No entanto, Leonardo reteve o conceito galênico de espíritos vitais como uma força fundamental da vida. Tendo

identificado o papel do ar como sustentador da vida em numerosas observações da vida animal e vegetal,[45] concebeu a ideia de que esses espíritos eram uma essência vital do ar isolada no coração, misturada ao sangue e em seguida transportada para a periferia do corpo a fim de animar todos os seus tecidos. De nossa perspectiva moderna, podemos perceber que a intuição de Leonardo estava absolutamente certa. O oxigênio é mesmo a essência sustentadora de vida presente no ar e o sangue oxigenado é uma "mistura" de sangue e ar que anima os tecidos do corpo.

O modelo teórico de Leonardo para a geração dos espíritos vitais é, basicamente, o mesmo modelo hidrodinâmico que ele usou para explicar a produção de calor corporal, mas o processo é um tanto mais complexo e ocorre predominantemente no ventrículo esquerdo:

> [O sangue] se aquece mais no ventrículo esquerdo, onde as paredes são mais grossas que no ventrículo direito. Esse calor sutiliza o sangue e vaporiza-o, convertendo parte dele em ar (...). O pulmão não pode enviar ar para o coração, nem isso é necessário, pois, como se viu, o ar é gerado no coração [e] misturado com calor e umidade condensada.[46]

Segundo Leonardo, a mistura de sangue e ar não é obtida do ar aspirado dos pulmões, conforme acreditava Galeno, mas surge da vaporização de parte do sangue. Desse modo, os espíritos vitais se formam a partir do calor, da umidade e da mistura de sangue e ar. A fim de produzir o calor necessário para esse processo, a turbulência do sangue no ventrículo esquerdo tem de ser bem mais forte que no ventrículo direito. Para Leonardo, isso era confirmado pelo fato de as paredes musculares do

ventrículo esquerdo serem mais grossas que as do ventrículo direito. (Sabemos hoje que isso se deve à maior força necessária para bombear o sangue ao longo da circulação sistêmica.)

Assim como sua explicação da temperatura corporal, a demonstração de Leonardo da geração dos espíritos vitais integrava observações colhidas de várias áreas de sua ciência num modelo teórico coerente: a relação entre fricção e calor, entre ar e sustentação da vida, entre calor e tecidos vivos do corpo – ou entre energia e processos metabólicos, como diríamos na moderna linguagem científica. Como resume Leonardo, "[sem] fluxo e refluxo, o sangue não se aqueceria, os espíritos vitais não poderiam ser gerados e, portanto, a vida seria destruída".[47]

Segundo Leonardo, os espíritos vitais criados no ventrículo es querdo são "aumentados e vivificados" por novas turbulências quando o sangue penetra na base da aorta ascendente:

> A revolução do sangue na antecâmara do coração, junto à base da aorta, presta-se a dois efeitos. O primeiro é que essa revolução, multiplicada em muitos aspectos, provoca por si mesma forte fricção, a qual aquece e sutiliza o sangue, aumentando e vivificando os es píritos vitais que se mantêm no calor e na umidade. O segundo efeito dessa revolução do sangue é fechar de novo, perfeitamente, as portas abertas [cúspides das valvas] do coração com seu primeiro movimento reflexo.[48]

Essa passagem resume o que podemos considerar a peça mais sofisticada e extraordinária dos estudos anatômicos do coração empreendidos por Leonardo. Para determinar a forma precisa da turbulência na aorta, ele analisou os padrões de fluxo por trás da valva aórtica com incrível precisão, desenhando-os repetidamente de vários

ângulos (ver, por exemplo, Fig. 8-4) e descrevendo-os em longos parágrafos de diversos fólios dos Estudos Anatômicos.[49] Mostrou que o sangue, passando pelo orifício triangular da valva, forma três redemoinhos distintos em movimento retrógrado após colidir com o sangue estacionário já presente na aorta. Leonardo demonstrou que esses vórtices são gerados quando o sangue flui por três bolsas da parede da aorta, logo atrás da valva aórtica. Deu a essas bolsas hemisféricas o nome de “hemiciclos”. Hoje elas são chamadas de seios de Valsalva em homenagem ao anatomista Antonio Valsalva, que as redescobriu no século XVIII.

A parte mais notável da análise de Leonardo dos três vórtices é sua descoberta de que eles enchem as cúspides semilunares da valva aórtica e começam a fechá-la antes que a contração do ventrículo termine e o peso da coluna de sangue na aorta feche a valva completamente. Leonardo encontra um argumento persuasivo contra a hipótese de a valva se fechar unicamente ao peso do sangue: “A forma da valva nega tal possibilidade, pois ela antes ficaria esmagada que fechada”,[50] escreve ao lado de um pequeno esboço de uma cúspide de valva esmagada (ver Fig. 8-4, canto superior esquerdo).

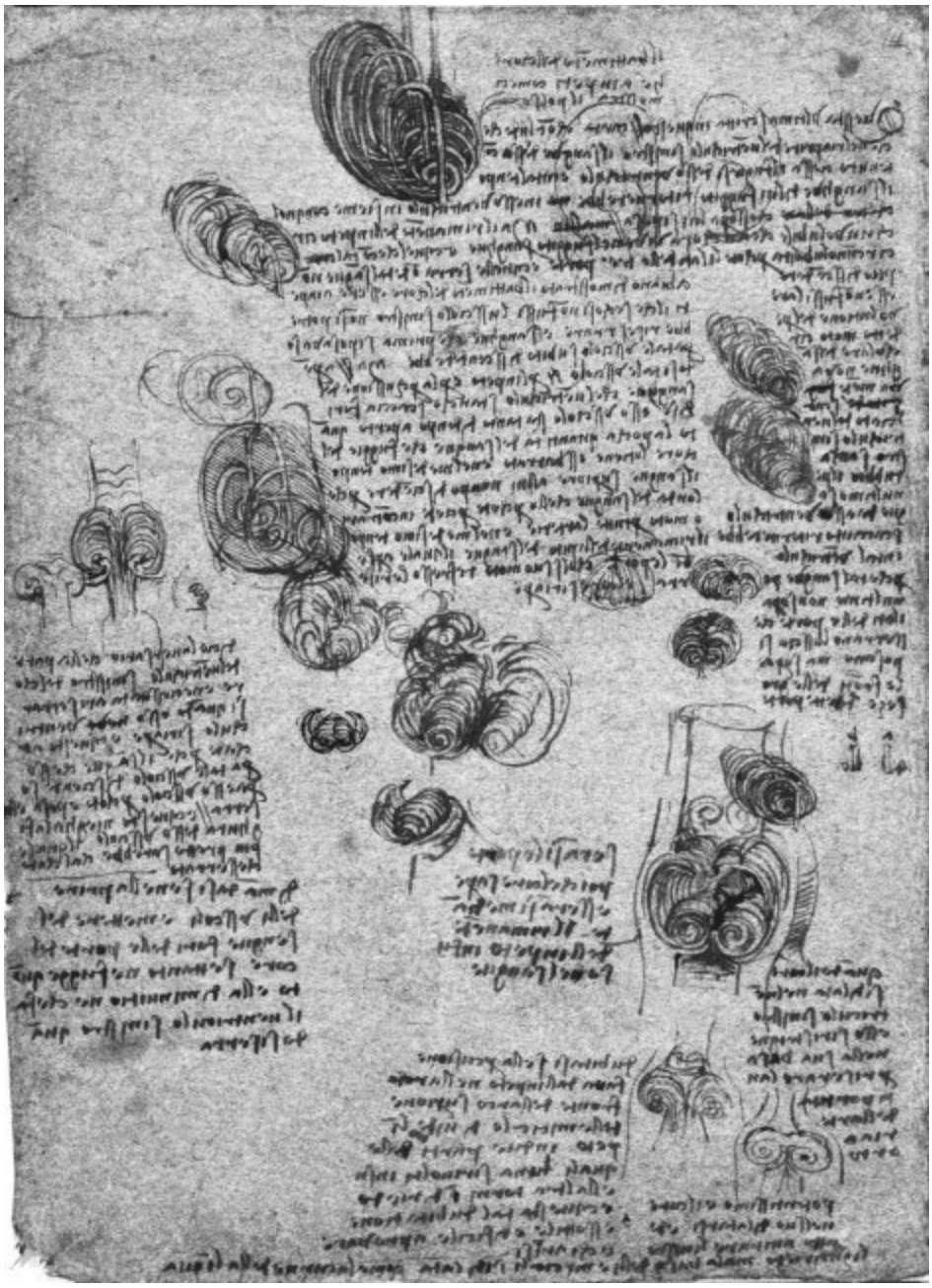


Figura 8-4: *Fluxos turbulentos de sangue na base da aorta (detalhe), 1513, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 172v.*

Leonardo percebeu que determinar os padrões exatos de turbulência na aorta era extremamente difícil e, às vezes, teve dúvidas de que sua interpretação estivesse correta. “Dúvidas sutis, difíceis de provar e esclarecer”, ponderou.[51] Mas não deixou as coisas no ponto em que

estavam. Por incrível que pareça, especialmente se levarmos em conta sua idade avançada na época, Leonardo planejou testar essa hipótese construindo um modelo de vidro da base da aorta, incluindo os seios aórticos, com uma valva tirada de um coração de boi. Despejaria água misturada com grãos de painço no modelo, para observar os fluxos turbulentos.[52] "Primeiro, porém, despejar cera na porta do coração de um boi", escreveu para si mesmo aludindo a uma técnica de dissecção que usara anos antes, "para ver a verdadeira forma dessa porta".[53]

Não sabemos se Leonardo chegou a construir seu modelo de vidro da aorta. Seja como for, a verificação experimental de sua hipótese (segundo a qual o fechamento da valva aórtica é iniciado por redemoinhos de sangue nos seios aórticos) teve de esperar mais de quatrocentos anos.[54] Esse é sem dúvida um dos casos mais impressionantes de descoberta científica bem à frente de seu tempo. Eis como o historiador da medicina Sherwin Nuland conta a história.

Até pelo menos o início do século XX, todos os pesquisadores cardíacos presumiam que a valva entre o coração e a aorta (a valva aórtica) funcionasse passivamente, como a de uma bomba de água comum: quando o coração se contrai, expele sangue e força a valva a se abrir para que esse sangue seja lançado na aorta; quando a pressão da contração diminui, a valva é forçada a fechar-se pelo peso da coluna de sangue na aorta, que a pressiona de cima. Essa parecia uma boa explicação para a hidráulica do sistema (...).

Em 1912, porém, demonstrou-se que a dinâmica não era tão simples assim. Ficou claro que o processo de fechamento da valva era mais gradual do que se esperaria de uma mudança brusca de pressão (...). Décadas passariam antes que a tecnologia de pesquisa chegasse a um ponto em que os detalhes pudessem ser satisfatoriamente explorados e concretamente visualizados.

Nos anos 1960, os métodos de corantes e cinerradiografia já estavam à altura de possibilitar o estudo dos padrões de fluxo com extrema precisão.

Descobriu-se que parte do sangue lançado na aorta passa pelos [seios de Valsalva] e forma redemoinhos que exercem pressão contra a superfície superior da valva, forçando-a a começar a fechar-se antes mesmo de o ventrículo completar sua contração. Isso não poderia ser conhecido sem os novos métodos de pesquisa.

Pelo menos, era o que se pensava. Leonardo da Vinci disse a mesma coisa na primeira década do século XVI (...). Tanto seu texto quanto sua ilustração mostram claramente o mecanismo correto da abertura e fechamento dos três folíolos que formam a valva aórtica, inclusive o fato de o início do fechamento se dever a redemoinhos originados nos seios de Valsalva.

Leonardo demonstrou repetidamente que o fechamento é gradual. Suas observações são idênticas às que grupos de pesquisadores fariam numa série de estudos iniciados em 1969 – e suas conclusões foram as mesmas (...). De todos os feitos espantosos que Leonardo legou às gerações futuras, esse parece ser o mais extraordinário.[55]

O FLUXO DE SANGUE PELO CORPO

Quando Leonardo visualizou o fluxo de sangue pelas câmaras do coração, artérias e veias, seu principal objetivo era compreender como os espíritos vitais são gerados, como "vivificam" os tecidos do corpo e como o sangue nutre esses tecidos. Em suma, ele queria entender os processos metabólicos básicos do corpo (como diríamos hoje), que são a própria essência da vida biológica.

O mapeamento preciso do movimento do sangue pelo coração e o corpo era um problema secundário para Leonardo. Como assinalam os historiadores da medicina O'Malley e Saunders, suas visões do tema variaram consideravelmente com o passar do tempo e ele nunca as registrou em forma definitiva.[56] Segundo esses estudiosos, a teoria de Leonardo do movimento do sangue pode ser resumida como se segue.

No início do ciclo cardíaco, o átrio direito se contrai enquanto o ventrículo direito se dilata, fazendo com que o sangue flua para o ventrículo e crie ali correntes turbulentas. Então o ventrículo direito se contrai enquanto o átrio se dilata, enviando o sangue de volta ao átrio e fazendo-o passar também pelos pulmões através das artérias pulmonares. Uma pequena porção de sangue "sutilizado" atravessa os poros do septo até o ventrículo esquerdo. Esse processo é facilitado pela dilatação do ventrículo esquerdo durante a contração do direito. Durante a dilatação, o ventrículo esquerdo também recebe sangue do átrio esquerdo que se contrai.

Em seguida, o ventrículo esquerdo se contrai, enviando parte do sangue de volta ao átrio e ejetando outra parte pela aorta. Nesse fluxo e refluxo forçado entre o átrio e o ventrículo esquerdo, o sangue se aquece consideravelmente e parte dele se evapora a fim de gerar os espíritos vitais, que são enviados aos tecidos do corpo através da aorta, juntamente com o sangue ejetado. Uma pequena porção do sangue vaporizado penetra nos pulmões pelas veias pulmonares e escapa para os brônquios. De ambos os lados, o sangue esfria nos pulmões antes de voltar aos átrios e ventrículos.

No ciclo cardíaco de Leonardo, os átrios e ventrículos se contraem e dilatam alternadamente, como na moderna compreensão da circulação sanguínea. Contudo, os ventrículos à esquerda e à direita não se contraem em simetria para facilitar a passagem do sangue pelos poros do septo quando o ventrículo direito se contrai e o esquerdo se expande. Em outras palavras, o átrio direito e o ventrículo

esquerdo se contraem em simetria durante a primeira fase do ciclo cardíaco de Leonardo; e o átrio esquerdo e o ventrículo direito se contraem em simetria durante a segunda fase.

Um dos problemas desse esquema era explicar como o sangue poderia ir e vir entre os átrios e ventrículos através das valvas que separam as duas câmaras em ambos os lados do coração. Leonardo enfrentou-o propondo uma sequência complexa de ações sincronizadas das duas valvas por meio de contrações e descontrações rítmicas de seus músculos papilares. Como observou Kenneth Keele: “É uma descrição bastante razoável e consistente da ação do músculo papilar. Seu erro reside basicamente na ignorância de Leonardo do fato de os músculos papilares serem parte da massa principal dos músculos cardíacos, que se contraem, todos eles, em sístole.”[57]

Relativamente ao fluxo de sangue pelas artérias e veias, Leonardo reteve a ideia fundamental de Galeno de seu fluxo e refluxo em dois sistemas vasculares separados, conforme dissemos. Isso implicava que, quando o sangue atingisse a periferia do corpo, fosse usado para a “vivificação” e nutrição dos tecidos, ou seja, seu fornecimento deveria ser constante. Na esteira de Galeno, Leonardo concluiu que o sangue era fabricado no fígado – e isso não é inteiramente incorreto, pois alguns de seus componentes essenciais (inclusive coagulantes e outras proteínas de plasma) são com efeito fabricados ali.

Em suas dissecções de vasos sanguíneos, o ponto de partida de Leonardo eram as obras de Avicena e Mondino.[58] Nesses dois textos, há uma enorme confusão entre artérias

e veias, confusão que em parte persiste nos trabalhos de Leonardo, onde a palavra *vene* é usada indiscriminadamente para descrever artérias e veias. Ele produziu a maior parte dos desenhos de vasos sanguíneos vários anos antes de suas anatomias sofisticadas do coração. Estas atingiram o ponto alto com a dissecção do centenário, por volta de 1508,[59] que Leonardo documentou numa série de magníficos desenhos anatômicos.

Um desses estudos mais bem realizados mostra os vasos sanguíneos do fígado, conhecidos hoje como vasos portal e hepático (Fig. 8-5). Os ramos maiores dessas artérias e veias, bem como as estruturas fractais de suas ramificações no fígado, são exibidos por Leonardo com tamanha clareza que os modernos cientistas médicos podem identificá-los com a maior facilidade.[60]

O sangue é levado ao fígado por dois grandes vasos. A artéria hepática transporta sangue rico em oxigênio da aorta abdominal e a veia porta conduz sangue misturado a material digerido do trato gastrointestinal. Esses vasos sanguíneos se subdividem várias vezes no fígado até formar diminutos capilares através dos quais o sangue penetra em agregados de células hepáticas, chamados lóbulos. O tecido do fígado é composto de milhares desses lóbulos, nos quais os nutrientes transportados pelo sangue são depois digeridos e que filtram várias substâncias tóxicas. Uma vez depurado, o sangue é recolhido por uma rede correspondente de veias minúsculas que convergem progressivamente para veias maiores e terminam numa única veia hepática que leva o sangue para a veia cava.

Os desenhos da Figura 8-5 revelam que Leonardo dissecou vasos sanguíneos a partir da substância do fígado a fim de demonstrar com clareza seus padrões de ramificação. A figura no alto da página apresenta as redes de vasos sanguíneos formadas no fígado pela artéria hepática e a veia porta. Leonardo mostra que a artéria nasce da aorta abdominal e lança vários ramos que levam sangue para os outros órgãos digestivos antes de entrar no fígado.[61]

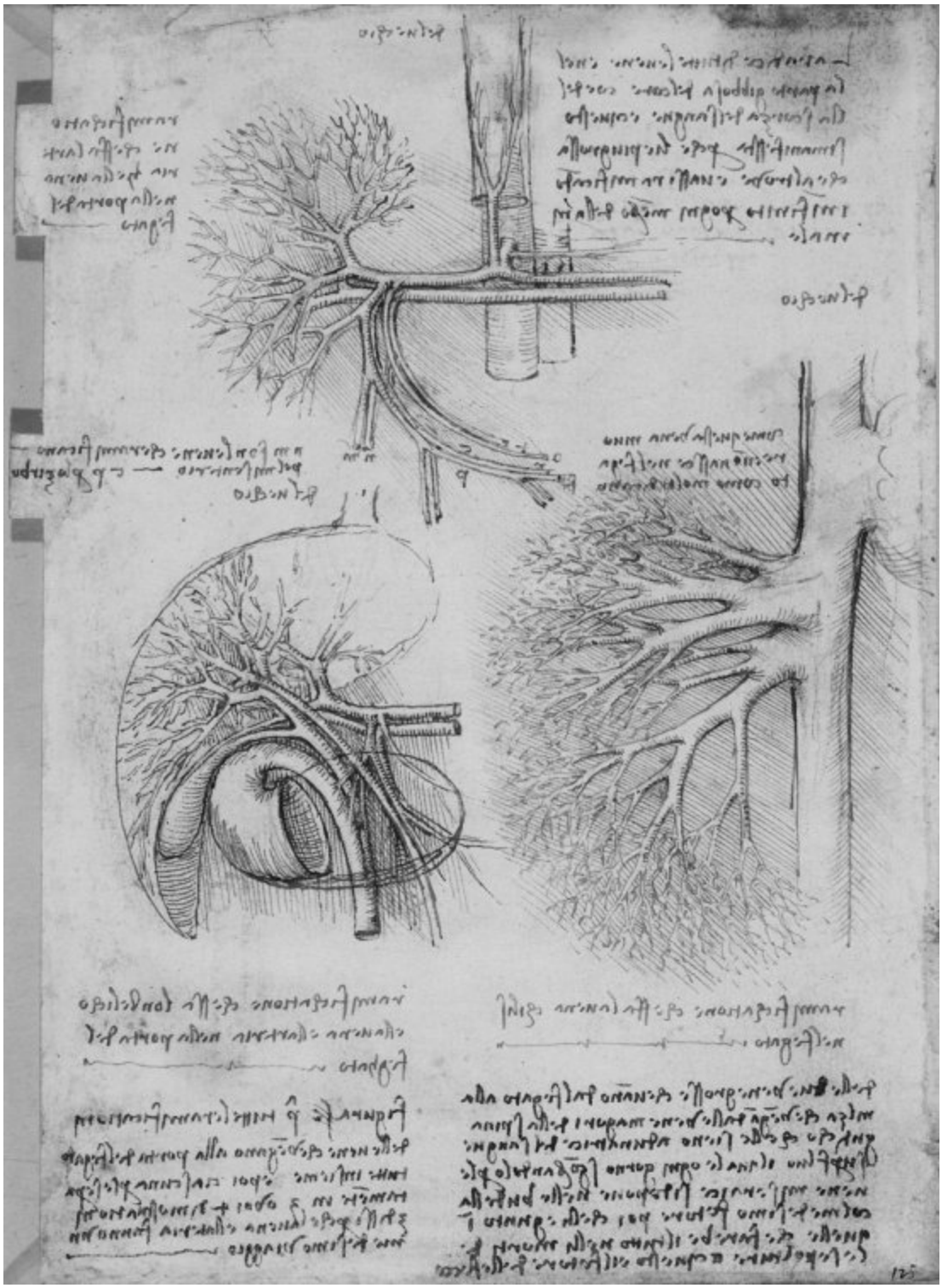


Figura 8-5: *Os Vasos Sanguíneos do Fígado, c. 1507-1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 60v.*

Embaixo dos ramos da artéria hepática fica a veia porta com suas ramificações (as veias hepáticas). Tanto a artéria hepática quanto a veia porta aparecem divididas em ramos direitos e esquerdos no fígado antes de gerar uma sequência de ramificações cada vez menores. A grande rede de veias hepáticas, com seus inúmeros ramos que vão ter à veia cava, aparece no canto direito inferior da figura. Além disso, Leonardo esboçou livremente a abertura da veia cava para o átrio direito do coração.

A figura da esquerda é praticamente a mesma da de cima. Mas aqui Leonardo indicou os contornos do fígado e do estômago, acrescentando alguns vasos, ou “ductos”, que levam a bile do fígado para outros órgãos digestórios. Nas palavras de O’Malley e Saunders: “A vesícula biliar, o ducto cístico, os ductos hepáticos e o ducto biliar comum que passa para o duodeno são descritos com impressionante clareza.”[62] O fato de cientistas médicos não terem hoje problema algum em identificar esses detalhes anatômicos, complicadíssimos para o leigo, é um testemunho notável das habilidades anatômicas e da maestria pictórica de Leonardo.

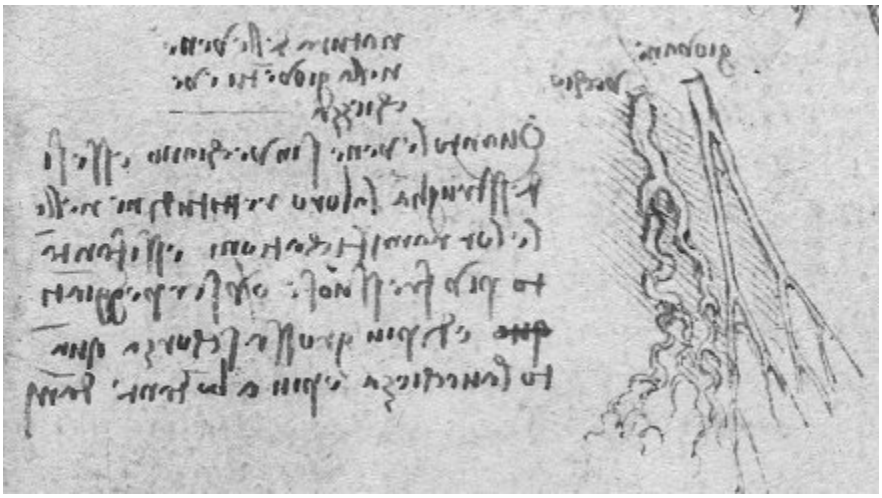


Figura 8-6: *Vasos sanguíneos do jovem e do homem idoso, c. 1507-1508, Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 69r.*

Leonardo realizou a anatomia do centenário que morreu em sua presença sem nunca ter tido uma doença grave "para descobrir a causa de uma morte tão doce".[63] A cuidadosa dissecção do corpo inteiro do idoso resultou não apenas numa série de soberbos estudos dos vasos sanguíneos e órgãos internos, mas também na mais famosa e mais impressionante descoberta médica de Leonardo.

Ele constatou que os vasos sanguíneos do homem idoso haviam ficado mais espessos com a idade, com ramificações mais tortuosas. Essa observação foi reforçada quando Leonardo, por coincidência, teve a oportunidade de dissecar os vasos finos e retos de uma criança de 2 anos, mais ou menos na mesma época. Registrou seus achados num fólio dos Estudos Anatômicos com dois pequenos esboços, um deles mostrando um conjunto reto de vasos ramificados, classificado de "jovem", e o outro um conjunto de ramificações tortuosas, classificado de "velho" (Fig. 8-6). Em nota ao lado dos desenhos, com o título de "Natureza dos vasos nas idades jovem e avançada", Leonardo

descreve sucintamente a condição hoje conhecida como arteriosclerose:

> Quando os vasos envelhecem, sua linha reta é destruída nas ramificações e eles se tornam muito mais sinuosos ou retorcidos, com o revestimento ficando cada vez mais espesso à medida que os anos passam.[64]

No *verso* do mesmo fólio, Leonardo desenvolve o tema da arteriosclerose senil até certo ponto, juntamente com uma interpretação brilhante e correta da condição, que notou ser mais severa nos vasos sanguíneos do fígado do homem idoso. Inicia sua análise pela descrição do espessamento das paredes vasculares, devido ao contato prolongado com o sangue rico em nutrientes, a consequente obstrução do fluxo sanguíneo e os efeitos do menor suprimento de sangue no fígado:

> A artéria e a veia (...) ficam com um revestimento espesso a ponto de restringir a passagem do sangue (...). E esses vasos, além de adquirir uma pele mais grossa, aumentam de comprimento e se retorcem como uma cobra, de sorte que o fígado perde a nutrição do sangue que ali chegava por aquelas veias. O fígado apresenta então uma aparência ressecada de pão duro tanto na cor quanto na substância; e, quando sujeito à menor fricção, desfaz-se em partículas minúsculas como pó de serra, deixando para trás veias e artérias.[65]

Segundo O'Malley e Saunders, essa passagem contém não apenas a primeira descrição da arteriosclerose na história médica, mas também o primeiro relato vívido e claro da cirrose do fígado.[66] Dois parágrafos adiante, na mesma página, encontramos a comovente história do encontro de Leonardo com o homem idoso no hospital de Santa Maria Nuova, seguida de seu diagnóstico da causa da morte do centenário:

> Fiz a anatomia dele para descobrir a causa de uma morte tão doce, que concluí ser fraqueza devida à falta de sangue e deficiência da artéria [aorta] que nutre o coração e as partes inferiores: ela estava seca, fina e mirrada (...). A outra anatomia foi a de uma criança de dois anos em que tudo era o contrário da do homem idoso.

À margem da mesma página, Leonardo encerra sua análise resumindo o quadro da arteriosclerose em linhas gerais:

> Os idosos que gozam de boa saúde morrem por falta de nutrição. Isso acontece porque (...) a passagem da veia meseraica [porta] é continuamente estreitada pelo espessamento de sua pele, que acaba atingindo os vasos capilares, os primeiros a se fechar por completo.

Essa passagem é notável também por mostrar que Leonardo foi o primeiro a usar o termo “vasos capilares” (*vene capillari*) para os minúsculos vasos sanguíneos, ainda desconhecidos em sua época.

Finalmente, ao pé da página, Leonardo insere essa descoberta no contexto geral de sua ciência das formas vivas observando que o processo de envelhecimento dos vasos sanguíneos representa um padrão geral de comportamento dos tecidos orgânicos:

> O revestimento dos vasos se comporta no homem como na laranja, em que a polpa vai diminuindo e a casca se espessando com o passar do tempo.

Depois da detalhada descrição e a correta interpretação da arteriosclerose, por Leonardo, decorreram mais trezentos anos até que essa condição fosse redescoberta. No início do século XIX, o anatomista Antonio Scarpa descreveu e ilustrou com exatidão o espessamento das paredes arteriais, baseando-se em suas dissecções, mas atribuiu o processo meramente a “causas internas desconhecidas”.

Cerca de trinta anos depois, o patologista e cirurgião Jean Lobstein cunhou o termo “arteriosclerose” e, como Leonardo, assegurou que essa condição era devida a um “estado de nutrição anormal” dos tecidos.[67] O papel do colesterol e outras substâncias gordurosas no espessamento e endurecimento dos vasos sanguíneos só foi pesquisado na segunda metade do século XX e ainda não está totalmente claro.

O SISTEMA DIGESTÓRIO E OS PROCESSOS METABÓLICOS DO CORPO

Quando Leonardo investigou o suprimento de sangue para o fígado e refletiu sobre os efeitos dos nutrientes do sangue nas paredes arteriais, já empreendera amplos estudos de todo o sistema digestório.[68] Nos dois anos que precederam sua dissecção do centenário, 1506-1508, produziu uma série de esplêndidas representações dos músculos abdominais, bem como do estômago, intestinos, fígado e baço. Além disso, demonstrou o suprimento de sangue para a vesícula biliar e desenhou os intricados vasos sanguíneos intestinais. Leonardo foi o primeiro a mostrar as corretas posições relativas dos intestinos delgado e grosso, e o primeiro também a reconhecer o apêndice, que desenhou claramente.

Em suas investigações da fisiologia da digestão, Leonardo descreveu precisamente o ato de deglutir e a passagem do alimento pelo esôfago até o estômago e os intestinos. Entretanto, não notou os movimentos peristálticos, a sequência de contrações do intestino que

empurra o alimento, e isso por causa de sua objeção ética à vivissecção. Leonardo atribuía o trânsito do alimento ao longo do trato digestório à pressão exercida pelo diafragma em seu movimento descendente. Um fólio dos Estudos Anatômicos contém uma discussão detalhada da função dupla do diafragma como “motor do alimento e do ar”.[69]

Sem acesso à bioquímica, Leonardo explicou a digestão, que hoje associamos às enzimas digestivas, como a fragmentação e liquefação do bolo alimentar no estômago e intestino pelo calor corporal, num processo de “cozimento”. Isso era consistente com as lições de Galeno, mas Leonardo discordou dele ao negar que o calor exigido para a digestão brotasse espontaneamente do intestino. Ao contrário, postulou que o calor era levado ao trato digestório pelo sangue, através das artérias intestinais.

Leonardo constatou que os nutrientes parcialmente digeridos são levados ao fígado pela veia porta. Concluiu, como Galeno, que no fígado eles são transformados em sangue, reconhecendo ainda que diversas impurezas saem do sangue para ser excretadas pela urina. No entanto, considerou erroneamente a bile (que facilita a digestão e a absorção de gorduras) uma mistura de detritos armazenados na vesícula biliar para ser em seguida eliminados.[70] Os erros de Leonardo não causam surpresa: toda explicação sem a ajuda da química seria absolutamente inadequada.

Depois de analisar todo o processo digestivo, do ato de mastigar e deglutir o alimento até sua transformação em sangue e a excreção dos detritos, Leonardo se voltou para os processos metabólicos na periferia do corpo. Sem

microscópio, não poderia observar as trocas de nutrientes, detritos e "espíritos vitais" (oxigênio) entre os tecidos e capilares, mas revelou notável intuição ao postulá-las. Com efeito, vislumbrou um aspecto fundamental do metabolismo dos tecidos (para empregar o termo moderno) que só seria redescoberto no século XX.

Leonardo distinguiu três importantes funções do sangue: "vivificar" os tecidos suprindo-os de oxigênio (os "espíritos vitais" gerados no coração), nutri-los com substâncias retiradas do alimento digerido e eliminar tanto tecidos gastos quanto detritos.[71] Os espíritos vitais, segundo Leonardo, se dissolvem nos capilares; sua essência vitalizante (identificada hoje com o oxigênio) é absorvida pelos tecidos e a umidade quente restante "se evapora pelas extremidades dos vasos capilares, na superfície da pele, sob a forma de suor".[72] Aqui, evidentemente, a química de Leonardo é um tanto vaga e ele não percebeu que o sangue, depois de conduzir oxigênio aos tecidos, prossegue circulando por uma rede de veias. Não obstante, sua compreensão intuitiva da difusão do oxigênio dos capilares para os tecidos é de fato notável.

Do mesmo modo, ele percebeu intuitivamente a troca de nutrientes e detritos entre os capilares e os tecidos – e foi essa percepção intuitiva que o levou a uma de suas descobertas mais extraordinárias. Ele comparara já o papel vivificante do ar, para os animais, ao modo como o ar sustenta a "vida" de uma chama.[73] Agora, estendeu essa analogia à nutrição dos tecidos do corpo pelo sangue numa longa passagem intitulada "como o corpo de um animal morre e renasce continuamente":

> O corpo de tudo aquilo que é nutrido está sempre morrendo e renascendo, pois a nutrição só pode entrar nos lugares onde a nutrição anterior se exauriu; ora, se ela se exauriu, então ali não há mais vida. Caso não seja fornecida uma nutrição igual à que desapareceu, a vida perde vigor; e se essa nutrição for retirada, a vida se destrói por completo. Entretanto, se o suprimento for igual ao consumido diariamente, então é renovada uma porção de vida igual à que desapareceu, assim como a luz de uma candeia se constitui da nutrição que recebe do combustível.[74]

A brilhante intuição exibida por Leonardo nessa passagem é que todo organismo, como a chama, precisa se alimentar de um fluxo constante de nutrientes para permanecer vivo e que esses nutrientes são o tempo todo absorvidos e transformados pelos tecidos do corpo, enquanto, graças ao mesmo processo, são gerados os detritos. Leonardo prossegue elaborando sua analogia entre a sequência de morte e renovação nos tecidos vivos e a combustão na chama da candeia:

> E essa luz também é constantemente renovada de baixo na proporção do que foi consumido em cima: ao morrer, a luz brilhante se transforma em fumaça fosca. Essa morte prossegue enquanto perdura a fumaça e a continuidade da fumaça é igual à continuidade da nutrição. No mesmo instante, a luz toda morre e é completamente regenerada junto com o movimento de sua nutrição.

Essa concepção, descrita em termos precisos e numa bela linguagem poética, coloca Leonardo séculos à frente de seu tempo. A definição de organismos vivos como “sistemas abertos”, que precisam recorrer a um fluxo contínuo de energia e matéria, foi proposta pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy na década de 1940, mais de quatrocentos anos depois de Leonardo tê-la reconhecido com clareza. “O organismo não é um sistema estático fechado ao exterior e contendo sempre componentes idênticos”, escreveu Bertalanffy. “É um sistema aberto num quase estado fixo

(...) em que há um constante trânsito de material de fora para dentro e de dentro para fora (...). Os fenômenos fundamentais da vida podem ser considerados consequências desse fato".[75]

Foram necessários mais trinta anos para que se formulasse uma teoria matemática dos sistemas abertos. Isso foi feito pelo físico e químico Ilya Prigogine, que deu a esses sistemas o nome de "estruturas dissipativas" e ganhou o Prêmio Nobel por sua teoria.[76] Hoje, a dinâmica do fluxo de energia e matéria através de uma estrutura dissipativa é considerada uma característica definidora da vida e a imagem da chama de uma candeia continua sendo usada como simples ilustração.

A NATUREZA DA VIDA

Os sofisticados estudos que Leonardo, já em idade avançada, realizou do coração e do fluxo de sangue representaram o clímax de sua pesquisa anatômica e, ao mesmo tempo, levaram-no a algumas de suas ideias mais profundas no esforço persistente para compreender a natureza da vida. Ele fez meticulosas descrições de inúmeros aspectos sutis da fisiologia cardíaca – inclusive as ações coordenadas das quatro câmaras do coração (quando seus contemporâneos só conheciam duas) e as correspondentes ações sincronizadas das valvas cardíacas. Ilustrou tudo isso numa série de desenhos soberbos. Segundo Kenneth Keele,

> O sucesso de Leonardo na anatomia cardíaca [foi] tão grande que há aspectos dessa obra ainda não igualados pela moderna ilustração anatômica (...). Sua prática consistente de ilustrar o coração e as valvas

> cardíacas, na sístole e na diástole, com uma comparação da posição das partes, raramente ou nunca é vista nos manuais anatômicos (...). O tratamento que deu às valvas e seus movimentos é tão meticuloso que muito dificilmente encontramos, nos livros modernos, ilustrações comparáveis.[77]

Leonardo não percebeu alguns detalhes cruciais da mecânica da circulação do sangue porque se empenhou na tarefa inviável de explicar, sem a química, a geração do calor corporal e da essência vivificante do sangue, identificada hoje com o oxigênio. Ao mesmo tempo, seu enfoque nos processos metabólicos possibilitou-lhe reconhecer inúmeros traços fundamentais do metabolismo dos tecidos que só seriam redescobertos séculos mais tarde. Estão aí incluídos os postulados de que a energia térmica controla os processos metabólicos; de que o oxigênio (os “espíritos vitais”) os sustenta; de que há um fluxo constante de oxigênio do coração para os tecidos da periferia do corpo; de que o sangue volta desses tecidos carregando detritos metabólicos; e, finalmente, o que pode ser considerado o feito máximo de Leonardo, de que a contínua absorção e transformação dos nutrientes, com a concomitante geração de detritos, é uma condição necessária para o sustento da vida e, portanto, uma propriedade fundamental de todos os tecidos vivos. É evidente, em vista de todas essas conquistas, que a teoria de Leonardo do funcionamento do coração e do fluxo de sangue levou-o a compreender algumas das características definidoras da vida biológica.

ORIGEM E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA VIDA HUMANA

Aprofundando-se no estudo das sutilezas dos movimentos do coração e do fluxo de sangue, Leonardo foi ficando cada vez mais interessado por outra dimensão do mistério da vida humana: sua origem e evolução nos processos de reprodução e desenvolvimento embrionário. O corpo principal dos estudos embriológicos de Leonardo encontra-se em três fólios da Coleção Windsor (196, 197 e 198), com data de 1510-1512. Esses fólios foram iniciados durante seus últimos anos em Milão, mas em Roma ele lhes acrescentou várias notas importantes e pequenos esboços.[78]

Na época de Leonardo, havia um intenso debate entre os filósofos sobre se o embrião humano era formado de duas "sementes" (uma do pai, outra da mãe) ou se suas características derivavam unicamente da semente masculina. Aristóteles ensinou que todas as características herdadas vinham do pai, com a mãe apenas fornecendo o terreno nutritivo em que o embrião crescia. Galeno, ao contrário, acreditava que as "sementes" do pai e da mãe contribuíam igualmente para as características do embrião. Depois de examinar ambas as teorias, Leonardo adotou sem hesitar a visão de Galeno, oferecendo-lhe o seguinte apoio empírico:

> Se um homem negro fecunda uma mulher branca, ela dará à luz um filho mulato. Isso mostra que a semente da mãe tem no embrião o mesmo poder que a semente do pai.[79]

O modo como Leonardo, graças a essa simples observação, deixou patente o preconceito ideológico de Aristóteles é típico de sua segura abordagem empírica ao conhecimento.

Embora Leonardo haja realizado pelo menos uma anatomia de um feto humano,[80] boa parte de seus estudos embriológicos se basearam em dissecções de vacas e ovelhas. A etapa mais primitiva do desenvolvimento embrionário que ele registrou pode ser vista num pequeno esboço do Codex Atlanticus. Mostra um corpo embrionário oval imerso no líquido amniótico e ligado à parede uterina por uma espécie de pedúnculo (Fig. 8-7). Segundo Kenneth Keele, um embrião com essa aparência, seja humano ou animal, deve ter mais ou menos dois meses de idade.[81]

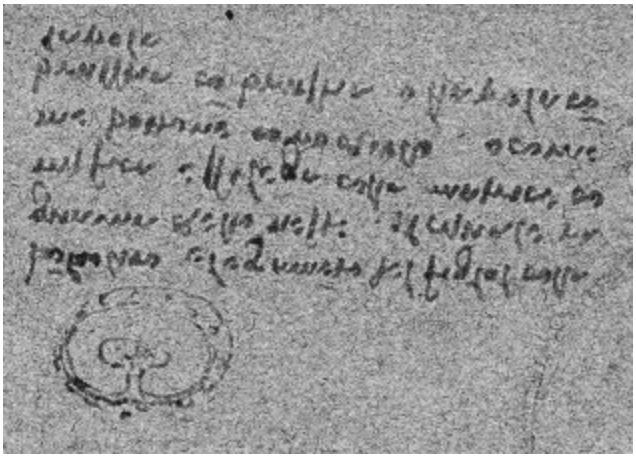


Figura 8-7: *Embrião em fase inicial (1 a 2 meses), Codex Atlanticus, fólio 1064r.*

Leonardo observou a mesma estrutura nos ovários de plantas florescentes, em que a semente, durante a primeira fase de desenvolvimento, também permanece ligada à parede ovariana por um pedúnculo. Conforme já vimos, ele considerava esse pedúnculo o equivalente do cordão umbilical, como fazem hoje os botânicos.[82] Essa observação, registrada num dos fólios dos estudos embriológicos da Coleção Windsor,[83] constitui um impressionante testemunho

da capacidade de Leonardo de vislumbrar padrões similares em diferentes sistemas vivos.

Outro esboço rudimentar mais ou menos da mesma época mostra um feto *in utero* com dois meses, envolto por uma série de membranas (Fig. 8-8). Num outro esboço logo abaixo, Leonardo mostra a aparência do feto depois de extraído e despojado das membranas, cortadas em forma de pétalas de flor.

O mais famoso e sofisticado dos desenhos embriológicos de Leonardo mostra um feto de cinco meses tal qual visto por uma incisão na parede uterina (Gravura 10).

A posição de sua cabeça e membros é ilustrada com uma precisão nunca antes alcançada e, percebe-se, com muito respeito e reverência pela evolução da vida humana.

Embaixo e à direita do desenho principal, Leonardo apresenta as eta pas de sua dissecção, seccionando e retirando delicadamente as membranas fetais. De novo, essas imagens lembram muito as pétalas de uma flor ou as camadas externas de uma semente – tocantes expressões visuais da fé profunda de Leonardo na unidade da vida em todas as escalas da natureza.

No centro da margem direita, encontramos o intrigante diagrama de uma bola rolando por um plano inclinado acima. Na legenda, Leonardo explica que ela pode fazer isso porque um pedaço de chumbo, pesando mais que o resto da bola, está preso à sua periferia na extremidade superior. O diagrama fornece uma explicação mecânica concisa do modo como o peso da cabeça do feto lhe permite girar

dentro da “bola de água” uterina pouco antes do nascimento, de modo que a cabeça se apresente primeiro.

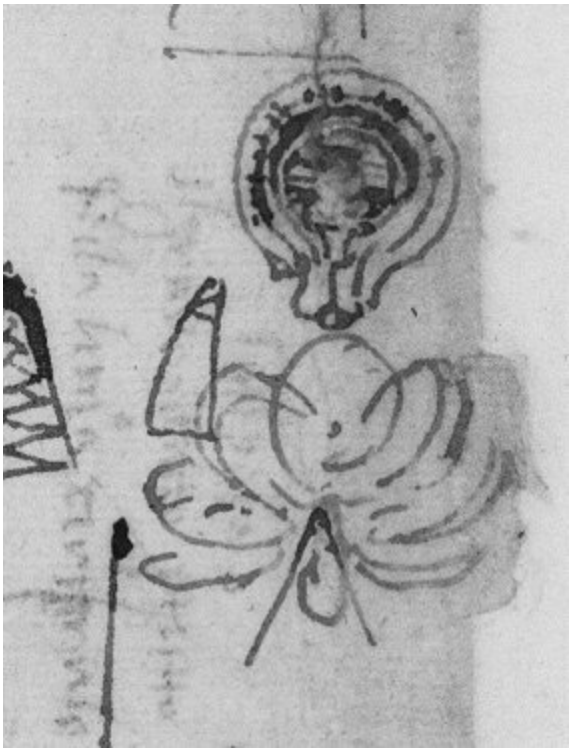


Figura 8-8: *Estudo de embrião em fase inicial, Codex Atlanticus, fólio 313r.*

Embora essa representação do feto no ventre materno se baseie obviamente na dissecção de uma mulher grávida após sua morte, as membranas uterinas e a placenta, tais quais mostradas na Gravura 10, são de uma vaca. Para os especialistas em anatomia, isso é evidente devido à representação estilizada da placenta como uma série de placas separadas presas à membrana fetal. Essas placas placentárias, chamadas cotilédones, são típicas do útero das vacas.

Nos esboços do alto da página, Leonardo estuda em minúcia como as protuberâncias das membranas fetais, conhecidas hoje como *villi*, se entrelaçam com as projeções

correspondentes da parede uterina. Aqui também a interdigitação da placenta e da parede do útero é mostrada como se ocorresse nas placas separadas (cotilédones) típicas das vacas.

Leonardo dissecava animais não apenas para encontrar analogias anatômicas com o corpo humano, mas também para explorar, pura e simplesmente, o corpo animal. Entre seus estudos anatômicos da Coleção Windsor, há uma folha com duas magníficas ilustrações do útero prenhe de uma vaca (Fig. 8-9). O desenho do alto mostra o útero em forma de crescente com os vasos sanguíneos uterinos e ovarianos. No desenho de baixo, conforme explica Kenneth Keele,[84] Leonardo removeu a parede uterina para expor os cotilédones dispersos e mostrar o feto através das membranas internas transparentes. O feto de bezerro, com a cabeça para baixo e para a esquerda no útero, as pernas e os cascos fendidos para cima e o corpo estirado na direção das pernas traseiras à direita, é reproduzido com a mesma delicadeza e meticulosidade que um feto humano. Na verdade, a “técnica de transparência” de Leonardo é tão sutil que o corpo do bezerro às vezes não é reconhecido à primeira vista.

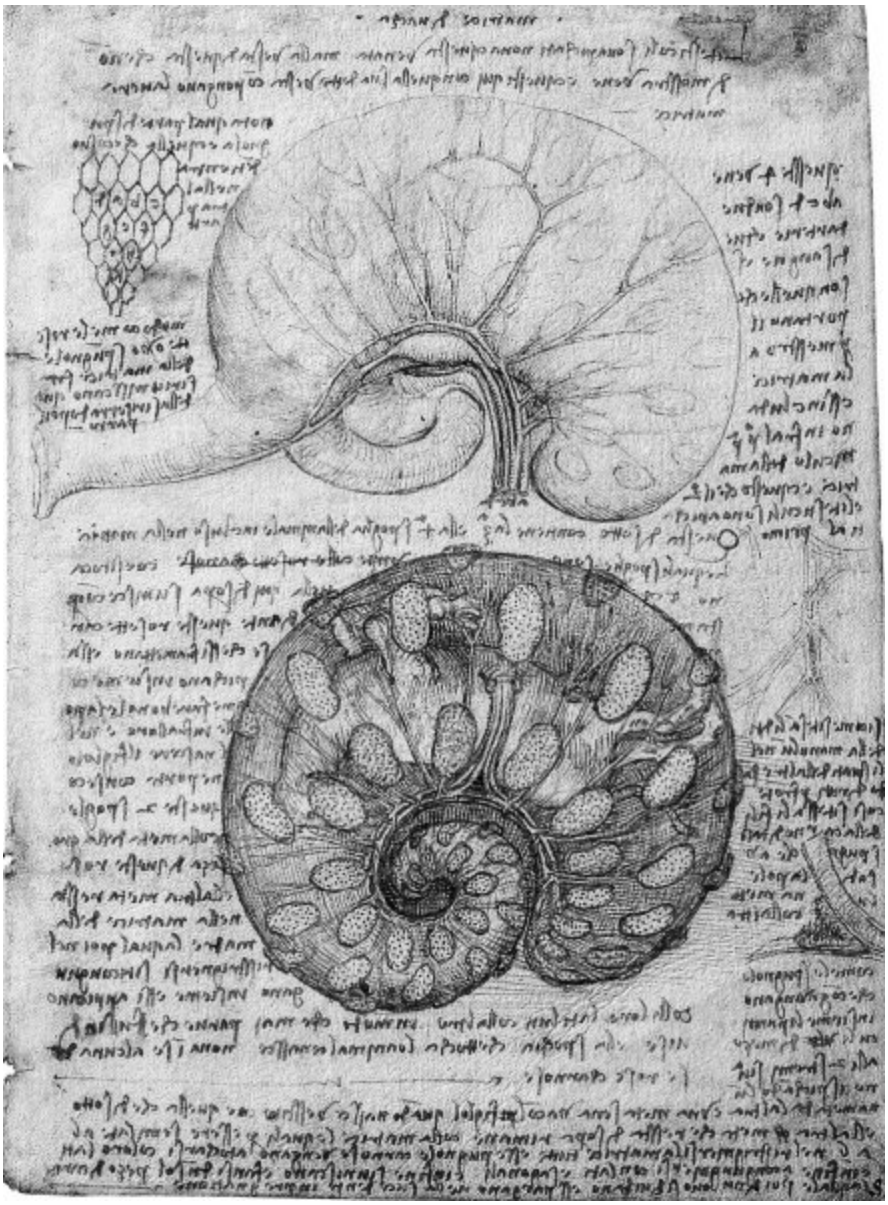


Figura 8-9: *O feto de bezerro no útero, c. 1506-1508; Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 52r.*

Os desenhos embriológicos de Leonardo são revelações tocantes e graciosas dos mistérios que cercam as origens da vida. Resumem o enorme zelo do artista, sua sensibilidade e absoluto respeito pela vida tanto animal quanto humana; deles transpira uma ternura verdadeiramente comovente. Nas palavras do médico Sherwin Nuland,

> [Seu] desenho de um feto de cinco meses no útero é de grande beleza (...). Uma obra-prima artística e, em vista do pouco que então se sabia no âmbito dos estudos embriológicos, uma obra-prima também de acuidade científica.[85]

Além de estudar as anatomias de embriões humanos e animais dentro do útero, Leonardo tentou determinar suas taxas de crescimento tanto no ventre materno quanto após o parto. “A criança”, observou ele, “cresce mais no corpo da mãe do que depois de nascer”.[86] Em vez de dobrar de tamanho a cada nove meses após o nascimento, Leonardo observou também, a taxa de crescimento da criança diminui progressivamente até o corpo atingir sua estatura de adulto. Leonardo foi o primeiro embriologista a fazer esses cálculos do crescimento fetal, só retomados ao fim do século XIX, quando o anatomista Charles Minot constatou as mesmas taxas decrescentes de crescimento que Leonardo já observara.[87]

Como em seus estudos cardiovasculares, Leonardo se interessou profundamente pelos processos metabólicos do corpo também na pesquisa que empreendeu em embriologia. No famoso fólio onde se vê o feto dentro do útero (Gravura 10), ele acrescentou uma longa nota no canto inferior esquerdo descrevendo seus processos vitais, começando com um resumo de seu metabolismo básico:

> O coração desta criança não bate e ela não respira, pois, estando o tempo todo na água, caso respirasse se afogaria. A respiração se torna desnecessária porque a criança é vivificada e nutrida pela vida e o alimento da mãe. Esse alimento nutre a criatura do mesmo modo que nutre as outras partes da mãe – mãos, pés etc.[88]

Leonardo se equivocou quanto aos batimentos cardíacos do feto. Não obstante, essa passagem mostra sua

perspicácia relativamente às trocas de oxigênio e nutrientes entre mãe e filho. Em outro fólio, as conexões entre metabolismo materno e fetal são exploradas com minúcia impressionante. Em vários desenhos, Leonardo estuda os órgãos envolvidos nesses processos: a placenta, que medeia todas as trocas metabólicas; os vasos umbilicais, que transportam os nutrientes; e o estômago, fígado e rins.[89] Esse é também o fólio em que ele registrou suas observações quantitativas sobre o crescimento fetal. A precisão e a sofisticação de suas pesquisas são tão notáveis que o eminente embriologista e historiador da ciência Joseph Needham chamou Leonardo de "pai da embriologia como ciência exata".[90]

Mais impressionante ainda, talvez, é o fato de Leonardo achar bastante natural incluir especulações a respeito da vida mental do embrião ao falar de seus processos vitais. A passagem acima citada prossegue, sem interrupção, com estes pensamentos inspirados:

> Uma só e mesma alma governa os dois corpos; desejos, medos e dores são comuns a essa criatura e a todas as outras partes animadas.[91]

Em outro fólio, Leonardo continua refletindo sobre a relação entre a alma da mãe e do filho. Eis como descreve a emancipação gradual da alma da criança:

> A alma da mãe (...) primeiro compõe dentro do ventre a figura humana e, no devido tempo, desperta a alma que a habitará. Esta, a princípio, permanece adormecida sob a guarda da alma da mãe, que a vivifica e alimenta por intermédio da veia umbilical.[92]

A concepção da alma humana expressa nessas duas passagens é extraordinária. Aos olhos dos contemporâneos

de Leonardo, ela deve ter parecido herética, pois contrariava inteiramente a doutrina da natureza divina da alma, preconizada pela Igreja. Leonardo, é claro, não publicou suas ideias, mas de algum modo o rumor de que defendia um conceito radicalmente diverso da alma humana chegou aos ouvidos do papa Leão X, que logo o proibiu de realizar novas autópsias ou dissecções humanas.[93]

Da perspectiva científica do século XXI, por outro lado, as contemplações de Leonardo parecem prenunciar num grau assombroso as visões da moderna ciência cognitiva. Já dissemos em outra parte que a concepção de Leonardo da alma humana como força geradora do corpo e seus movimentos, e também como agente da percepção e do conhecimento, corresponde de perto ao conceito de cognição da moderna ciência cognitiva.[94]

Em seus estudos embriológicos, Leonardo recorre a esse conceito para descrever em bela linguagem poética a relação entre a alma da mãe e a alma da criança por nascer. Ele assevera, como diríamos na linguagem científica de hoje, que a formação do corpo do embrião e a organização de seu metabolismo são num primeiro momento orientadas pelos processos cognitivos da mãe e que aos poucos as capacidades auto-organizadoras do organismo fetal vão surgindo à medida que as funções cognitivas se desenvolvem. A descrição sutil que Leonardo faz do surgimento e desenvolvimento da vida mental do embrião juntamente com seu corpo é, sem dúvida, impressionante.

O MISTÉRIO DA VIDA NA ARTE DE LEONARDO

Já perto da morte, Leonardo se mostrou fascinado pelo mistério da origem da vida não apenas em sua ciência, mas também em sua arte. Duas de suas pinturas mais pessoais, *Leda e o Cisne* e *Mona Lisa*, são devotadas a esse tema majestoso. *Leda* é o único nu feminino e o único quadro inspirado num mito da Antiguidade que Leonardo produziu – a sedução da bela esposa do rei de Esparta por Zeus disfarçado de cisne. A obra não foi encomendada, mas ainda assim Leonardo trabalhou nela anos a fio, evidentemente obedecendo a um forte impulso pessoal.

Terminou-a em Roma e levou-a consigo até sua última morada em Amboise, juntamente com a *Mona Lisa*, a *Santa Ana* e o *São João Batista*.[95] Após a morte de Leonardo, muitas cópias da *Leda* foram feitas por pintores italianos e flamengos, mas o original, infelizmente, se perdeu ou foi destruído a certa altura do século XVII. A cópia hoje exibida na Galleria degli Uffizi, em Florença (Gravura 11), talvez seja uma das que mais se aproximem do original de Leonardo.

O pintor não nos mostra o amplexo sexual da mulher e do cisne, mas apresenta os frutos de sua união: dois grupos de gêmeos saindo das cascas rompidas dos ovos. Assim, Leonardo transforma o mito antigo numa alegoria do mistério da fertilidade e do poder de procriação da mulher. A pintura é eroticamente carregada não apenas por causa da beleza nua da mulher e do pescoço sinuoso, anormalmente alongado do cisne, mas também em consequência da abundante fertilidade da paisagem que os cerca – relva luxuriante e caniços fálicos brotando de um chão úmido, pantanoso.[96] Pintando a abundância dessas

forças geradoras no reino das plantas, animais e homens, e usando o mito grego para transcender fronteiras de espécies, Leonardo celebra o mistério universal do poder de procriação inerente à vida.

A *Mona Lisa* (Gravura 12), mais famosa pintura de Leonardo, era originalmente o retrato de uma jovem florentina, Lisa del Giocondo, encomendado por seu marido rico. Entretanto, não se sabe o motivo, o quadro jamais foi entregue. Leonardo ficou com ele até morrer e, ao longo dos anos, transformou-o numa meditação pessoal sobre a origem da vida. A pintura é diferente de seus outros retratos – na verdade, é diferente de *todos* os outros retratos. A diferença mais gritante, nas palavras de Daniel Arasse, é "o violento contraste entre a doçura da mulher e a selvagem austeridade da paisagem arcaica ao fundo".[97]

Esse fundo é um panorama nu, escarpado, com as míticas formações rochosas, lagos e regatos que Leonardo pintou durante toda a sua vida. Aqui, porém, a paisagem não é apenas uma cortina distante, mas tornou-se um protagonista de destaque, tão essencial quanto a figura em primeiro plano. As formas da Terra são pintadas em constante movimento e transformação, com as águas primordiais cortando rochas, escavando vales e depositando massas de cascalho e areia que, por fim, se transformarão em solo fértil. O que vemos aqui é o nascimento da Terra viva a partir das águas dos oceanos primitivos.

Como observou Martin Kemp,[98] o plano de fundo e o primeiro plano da pintura são esteticamente ligados por uma série de semelhanças, com vários detalhes da superfície da paisagem reaparecendo no cabelo e nas

roupas da figura – as dobras espiraladas do véu sobre seu seio esquerdo, as delicadas cascatas da cabeleira e os realces luminosos na roupa e na paisagem. São evocações simbólicas das similaridades entre a Terra viva e o corpo humano vivo – em particular, entre a origem da vida no macrocosmo e no microcosmo. Sabemos que a *Gioconda*, como é chamada na Itália, era uma jovem mãe; e Kenneth Keele, examinando a mulher do retrato com olhar de médico, acha que a Mona Lisa de Leonardo estava de fato grávida quando posou para a obra.[99]

A evidência citada por Keele em apoio dessa hipótese é convincente: a postura ereta da jovem, recostada numa confortável poltrona cujo braço aperta de leve com a mão esquerda; o quase imperceptível inchaço dos dedos, dos quais removeu todos os anéis; a forma “matronal” do corpo inteiro, a plenitude dos seios e a linha cuidadosamente disfarçada do abdome. “Dentro de seu corpo”, escreve Keele, “está um novo mundo vivo sob a forma de um bebê que se avoluma nas águas amnióticas assim como o grande mundo brota das águas do mar”.[100] O célebre e misterioso sorriso da Mona Lisa, nessa interpretação, constitui uma alusão sutil ao segredo que jaz em seu ventre.

Quer aceitemos ou não a hipótese de gravidez aventada por Keele, o tema central da admirada obra-prima de Leonardo é inquestionavelmente o poder de procriação da vida, tanto no corpo da mulher quanto no corpo da Terra viva. *Leda* e *Mona Lisa* são, pois, meditações sobre a origem da vida, o tema que mais esteve na mente de Leonardo em sua velhice.

Ele bem sabia que, em última análise, a natureza e a origem da vida permaneceriam um mistério mesmo para sua mente científica brilhante. “A natureza está repleta de causas infinitas que nunca se manifestaram na experiência”,[101] declarou ele por volta dos 40 anos; e, à medida que envelhecia, esse senso de mistério se aprofundava. Quase todas as figuras de seus últimos quadros apresentam esse sorriso que exprime o inefável, muitas vezes combinado com um dedo em riste. “Mistério, para Leonardo”, escreveu Kenneth Clark, “era uma sombra, um sorriso e um dedo apontado para a escuridão”.[102]

APÊNDICE A

Cronologia da vida e das obras de Leonardo

A cronologia abaixo baseia-se no relato mais pormenorizado da vida de Leonardo que fiz nos Capítulos 3 e 4 do meu livro *A Ciência de Leonardo da Vinci*.

1. Toscana, 1452-1481
(do nascimento aos 29 anos)

1452 Leonardo nasce em Vinci, filho de Caterina e Ser Piero da Vinci; é criado pelos avós e pelo tio Francesco; filho ilegítimo, não terá acesso à universidade;

1464 morre o avô; Leonardo vai morar com seu pai em Florença;

1467 começa a trabalhar no ateliê de Andrea del Verrocchio (talvez antes dessa data); “muitas flores retratadas do natural”;

1469 pinta um dragão num escudo de madeira;

1470 colabora no *Batismo de Cristo* de Verrocchio (1470-1475);

1471 Verrocchio termina a execução de uma grande esfera de ramos que é instalada em cima da cúpula brunelleschiana da catedral de Florença;

1472 aos 20 anos torna-se mestre pintor e começa a participar da corporação dos pintores florentinos, mas continua trabalhando no ateliê de Verrocchio;
peça de tapeçaria (perdida); *Madonna Dreyfus*; primeiros desenhos de trajes e projetos de instrumentos de cenário para teatro; primeiras invenções (1473-1477): instrumentos ópticos, método para criar o vácuo e levantar água, equipamento para imersão, lagar para a prensagem de azeitonas; tentativas de obter um movimento perpétuo da água;

1473 desenho da Val d'Arno; *Anunciação* (1473-1475);

1476 retrato de *Ginevra de' Benci* (1476-1478);

1477 deixa o ateliê de Verrocchio para afirmar-se como artista independente, mas sem empenhar-se muito nessa atividade;

1478 inundações em Florença; conjuração dos Pazzi;
começa a trabalhar em "duas Virgens Marias", uma das quais foi identificada com a *Madonna Benois*; primeiros projetos de dispositivos mecânicos; primeiras invenções militares (1478-1481);

1480 *São Jerônimo*;

1481 É ignorado por Lourenzo de Médici;
começa a trabalhar na *Adoração dos Reis Magos*;

II. Primeiro Período em Milão, 1482-1499
(dos 30 aos 47 anos)

1482 transfere-se para Milão, deixando incompleta a *Adoração dos Reis Magos*; escreve a Ludovico Sforza uma carta na qual oferece seus serviços como engenheiro e artista; não recebe uma resposta imediata;

1483 começa a trabalhar em *A Virgem do Rochedo* (versão do Louvre, 1483-1486);

1484 Milão assolada pela peste (1484-1485); Leonardo dedica-se como autodidata a um intenso programa de estudos (1484-1489); começa a escrever o primeiro dos seus cadernos de notas (Códice Trivulziano); começa a reunir uma biblioteca pessoal; primeiros estudos científicos: luz, visão, perspectiva, percepção sensorial; estudos geológicos e botânicos para a *Virgem do Rochedo*; primeiros estudos sobre o voo dos pássaros; projetos urbanísticos em resposta à epidemia da peste;

1485 *Retrato de Músico*;

1487 amizade com o arquiteto Donato Bramante;
projetos arquitetônicos para a torre principal da catedral de Milão;

1488 *A Dama com Arminho* (1488-1490);

1489 começa a trabalhar numa estátua equestre (“o grande cavalo”); primeira fase de desenhos anatômicos (crânios com o percurso seguido pelos estímulos visuais, sistema nervoso); estudos de músculos;
invenções mecânicas para a transmissão de movimento e energia; máscara para o casamento de Gian Galeazzo Sforza;

1490 plena aceitação na corte dos Sforza; começa a escrever “*Paragone*” [Paragão, comparação, cotejo], (confronto entre a pintura e as demais artes); grande laboratório em Corte Vecchia; sua biblioteca pessoal perfaz quarenta volumes; dirige-se a Pavia com Francesco di Giorgio; estudos na biblioteca do castelo dos Visconti em Pavia; conhece Fazio Cardano; início de um forte interesse pela matemática;

revisão dos desenhos técnicos executados anteriormente, com o acréscimo de comentários teóricos;

estudos das proporções humanas; desenha o *Homem Vitruviano*; projetos de máquinas voadoras;

festas e entretenimentos em Milão; máscara "A Alegoria dos Planetas";

1491 recolhe apontamentos sobre o "grande cavalo"; estudos de geometria e óptica; estudos de mecânica; planos para a redação de um tratado intitulado *Elementos das Máquinas*;

1493 modelo em argila do "grande cavalo"; técnica de cena; começa a estudar latim;

1495 começa a trabalhar em *A Última Ceia*;

1496 conhece o matemático Luca Pacioli, com quem estuda Euclides; desenhos para o *De Divina Proportione* de Pacioli; *Retrato de Mulher*;

1498 visita Gênova e a Saboia; escala o monte Rosa; termina *A Úl - tima Ceia*;

decoração da *Sala delle Asse* [Salão das Tábuas de Madeira]; amplos estudos de mecânica (1497-1499);

1499 os franceses ocupam Milão; Leonardo sai da cidade com Pacioli;

III. Veneza, Florença, Romanha, 1500-1506
(dos 48 aos 54 anos)

1500 visita Mântua; retrato de Isabella d'Este;

em março chega a Veneza; projetos de submarinos; trabalha nos canais da cidade;

inventa uma porta com fechadura especial; dirige-se a Friuli na qualidade de engenheiro militar;

projeta uma barragem no Isonzo; deixa Veneza depois de um mês; regressa a Florença para

continuar a estudar matemática com Pacioli; estudos para *A Virgem e Menino com Santa Ana*;

1501 *Madonna e Menino com o Fuso* (1501-1507);

1502 faz extensas viagens na Toscana e na Romanha como engenheiro militar a serviço de César Borgia; inspeções de fortificações; encontra Maquiavel; desenha mapas de várias zonas das duas regiões; mapa de Ímola; projetos de canais e para o aproveitamento de pântanos;

1503 regressa a Florença; começa *A Batalha de Anghiari*; engenheiro militar para a senhoria florentina;
viaja à Toscana; mapas; amplos estudos geológicos;
planos para desviar o Arno; projeto de um canal "industrial";

1504 morte do pai de Leonardo;
projetos de fortificações (Piombino); obras hidráulicas;

1505 os livros da biblioteca pessoal são 116; inicia *Mona Lisa* e a *Leda*; começa a escrever o tratado matemático *On Transformation* (Codex Forster);
amplos estudos sobre o voo dos pássaros; projetos de máquinas voadoras;

1506 deixa Florença sem ter podido completar *A Batalha de Anghiari*;

IV. Segundo período em Milão, 1506-1513
(dos 54 aos 61 anos)

1506 chega à corte francesa de Milão; o governador do ducado Carlos de Amboise é um grande admirador seu; pode dedicar-se aos seus estudos científicos com uma liberdade sem precedentes; elabora e aperfeiçoa *Santa Ana, Mona Lisa* e *Leda*; desenha

cenários e trajes teatrais; projeta a vila e os jardins para Carlos; trabalha nos canais lombardos;

estudos extensos de hidráulica e fluidodinâmica (1506-1509); estudos anatômicos de músculos superficiais, vasos sanguíneos, nervos e órgãos internos (1506-1508);

1507 conhece Francesco Melzi, que se tornará seu discípulo e companheiro inseparável;

morre o tio de Francesco; residência de seis meses em Florença para sistematizar as questões testamentárias;

1508 divide o seu tempo entre Florença e Milão; ajuda o escultor Giovan Francesco Rustici com estátuas de bronze;

A Virgem do Rochedo (versão londrina) em colaboração com Ambrogio Predis; revê os seus cadernos de notas de apontamentos e projeta organizá-los sistematicamente; delineia os conteúdos de alguns tratados exaustivos; aprofundados estudos anatômicos dos órgãos internos, especialmente o coração e o fluxo do sangue (1508-1513); executa a dissecação do "centenário" em Florença; começa seus estudos de botânica (1508-1512);

1509 recolhe suas notas sobre a pintura no *Livro A* (perdido); estudos geológicos na Lombardia;

1510 continua a trabalhar na *Mona Lisa* e na *Leda*; projeta o monumento equestre para a tumba de Giangiacomo Trivulzio (que não foi terminado); conhece o anatomista Marcantonio della Torre;

1511 em dezembro os franceses são expulsos de Milão [tropas suíças aliadas do papado atacam os franceses em Milão]. Leonardo refugia-se na propriedade dos Melzi;

1512 passa quase dois anos como hóspede dos Melzi; estudos das turbulências da água; dissecções de

animais; estudos botânicos; projeto para a ampliação da Villa Melzi;

1513 Leão X (Giovanni de' Medici) é eleito papa; Leonardo parte para Roma, convidado pelo irmão do papa Giuliano de Médici;

V. Roma, Amboise, 1513-1519
(dos 61 aos 67 anos)

1513 chega a Roma em outubro; reside perto do Belvedere no Vaticano; Desenha seu famoso autorretrato;

1514 é um artista venerado, mas já fora de moda; sente-se sozinho e deprimido; "desenhos do dilúvio"; prossegue os seus estudos científicos com energia intacta; amplos estudos de botânica; geometria das transformações;

viagem a Civitavecchia, Parma, Vicenza, Florença, Milão; planos para o drenagem dos pântanos de Pontino; consultoria de arquitetura e engenharia; projetos de instrumentos mecânicos e ópticos;

1515 Francisco I conquista Milão; Leonardo produz uma peça singular de arte e tecnologia – um leão mecânico – para o rei da França; estudos de cardiologia e embriologia; conflitos com o papa sobre a natureza da alma;

é proibido de realizar dissecções;

termina *Santa Ana, Mona Lisa* e *Leda*; pinta *São João Batista;*

1516 transfere-se para Amboise, convidado por Francisco I; instala-se no castelo Cloux, conhecida hoje como Clos-Lucé, contígua ao Château; mantém longas conversações com o jovem rei; reorganiza o material dos cadernos de notas, provavelmente com vistas a

uma publicação; programa escrever muitos novos tratados; projetos para a reedificação do castelo real;

1517 visita do cardeal de Aragão; paralisia do braço direito; acompanha o rei a Romorantin; projetos urbanísticos para uma nova capital;

1518 cria grandiosas representações para as festas de corte; desenha trajes e emblemas reais;

1519 morre em Cloux; confia seu patrimônio artístico e intelectual a Francesco Melzi.

APÊNDICE B

Cronologia das descobertas científicas

No gráfico seguinte estão relacionadas as descobertas científicas mais importantes realizadas por Leonardo da Vinci nos séculos XV e XVI, juntamente com a indicação dos séculos em que foram redescobertas por outros cientistas. Encontram-se aqui também as notas das páginas desse livro (entre parênteses) em que se fala das descobertas, assim como [entre colchetes] as das páginas do meu livro anterior dedicado a Leonardo, *A Ciência de Leonardo da Vinci*.

Descobertas científicas

Leonardo	**Descobertas por outros**			
	Séculos			
(1452-1519)	XVII	XVIII	XIX	XX
Óptica natureza ondulatória da luz [p. 240]	c. 1678 Christiaan Huygens			
dispersão de Rayleigh (por que o céu é azul?) [p. 241]			c. 1871 Lord Rayleigh	

Descobertas científicas

Leonardo	Descobertas por outros
	Séculos
(1452-1519)	XVII XVIII XIX XX
Acústica natureza ondulatória do som [p. 240]	c. 1636 — Marin Mersenne
padrões de Chladni (linhas nodais sobre lâminas vibrantes) [p. 243]	c. 1787 — Ernst Chladni
Dinâmica dos Fluidos universalidade dos fluxos (independentemente da substância) (p. 38)	c. 1738 — Daniel Bernoulli
visualização dos fluxos (grãos de milho, corantes etc.) (p. 41)	c. 1883 — Osborne Reynolds
Viscosidade (p. 43)	c. 1687 — Isaac Newton
princípio de continuidade (conservação da massa) (p. 48)	c. 1628 — Benedetto Castelli
dinâmica dos vórtices de água (p. 22)	c. 1858 — Hermann von Helmholtz
cascata de Richardson (vórtices de escalas decrescentes) (p. 56)	c. 1922 — Lewis Richardson

Descobertas científicas

Leonardo

(1452-1519)

Descobertas por outros

Séculos

XVII XVIII XIX XX

decomposição de turbulência de Reynolds
(p. 61)

Geologia
sobreposição de estratos rochosos
(p. 79)

grande duração do tempo geológico
(p. 87)

natureza dos fósseis
(p. 96)

anéis de crescimento nas conchas fósseis, usados para lhes determinar a idade
(p. 98)

ciclo rochoso (erosão, sedimentação, elevação, erosão)
(p. 108)

Botânica
fundação da morfologia e fisiologia vegetal
(p. 132)

padrões de ramificações ligados à fisiologia do fluxo nutritivo
(p. 136)

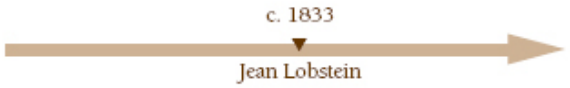
Descobertas científicas

Leonardo	Descobertas por outros			
	Séculos			
(1452-1519)	XVII	XVIII	XIX	XX
contribuição da luz do sol para o crescimento das plantas (p. 141)		c. 1779 Jan Ingenhousz		
contribuição do ar para o crescimento das plantas (p. 141)		c. 1779 Jean Senebier		
tropismo (orientação das plantas) em resposta a estímulos ambientais (p. 141)			c. 1880 Charles Darwin	
regulação do crescimento das plantas por parte dos hormônios ("seiva vital") (p. 141)				c. 1913 Peter Boysen-Jensen
migração da seiva (auxinas) do lado claro para o lado escuro do tronco (p. 145)				c. 1928 Frits Went
anéis de crescimento anuais, ligados ao clima dos anos (p. 134)				c. 1937 Andrew E. Douglass
Mecânica relatividade do movimento (p. 208)	c. 1656 Christiaan Huygens			
antecipação do princípio de conservação da energia (p. 214)			c. 1840 James Joule	

Descobertas científicas

Leonardo	**Descobertas por outros**
	Séculos
(1452-1519)	XVII XVIII XIX XX
definição da força de atrito (p. 220)	c. 1785 — Charles Coulomb
dissipação da energia (p. 221)	c. 1824 — Sadi Carnot
antecipação da "seta do tempo" (processos irreversíveis) (p. 222)	c. 1928 — Arthur Eddington
natureza parabólica das trajetórias balísticas (p. 233)	c. 1609 — Galileo Galilei
terceira lei do movimento de Newton: ação = reação (p. 248)	c. 1687 — Isaac Newton
Aerodinâmica aerodinâmica: o justo fundamento para uma ciência do voo (p. 297)	c. 1809 — George Cayley
princípio do túnel do vento (p. 314)	c. 1871 — Francis H. Wenham
distribuição de densidade em torno das asas de um pássaro (p. 330)	c. 1810 — George Cayley

Descobertas científicas

Leonardo	**Descobertas por outros**
	Séculos
(1452-1519)	XVII XVIII XIX XX
Anatomia humana esfíncter da pupila [p. 247]	
átrios do coração (p. 346)	
sístole como movimento ativo do coração (p. 350)	
músculos papilares e seus tendões (p. 348)	
fechamento gradual da valva aórtica causado pelas turbulências do sangue (p. 357)	
descoberta dos seios aórticos (seios de Valsalva) (p. 357)	
descoberta e explicação da arteriosclerose (p. 365)	
definição dos organismos vivos como “sistemas abertos” (p. 369)	

Descobertas científicas

Leonardo	**Descobertas por outros**			
	Séculos			
(1452-1519)	XVII	XVIII	XIX	XX
observações quantitativas sobre o crescimento fetal (p. 376)			c. 1892 ▼ Charles Minot →	
desenvolvimento da vida mental do embrião (p. 379)				c. 1970 ▼ Humberto Maturana →
Ecologia antecipação das cadeias e ciclos alimentares (p. 332)				c. 1927 ▼ Charles Elton →

APÊNDICE C

Gravuras

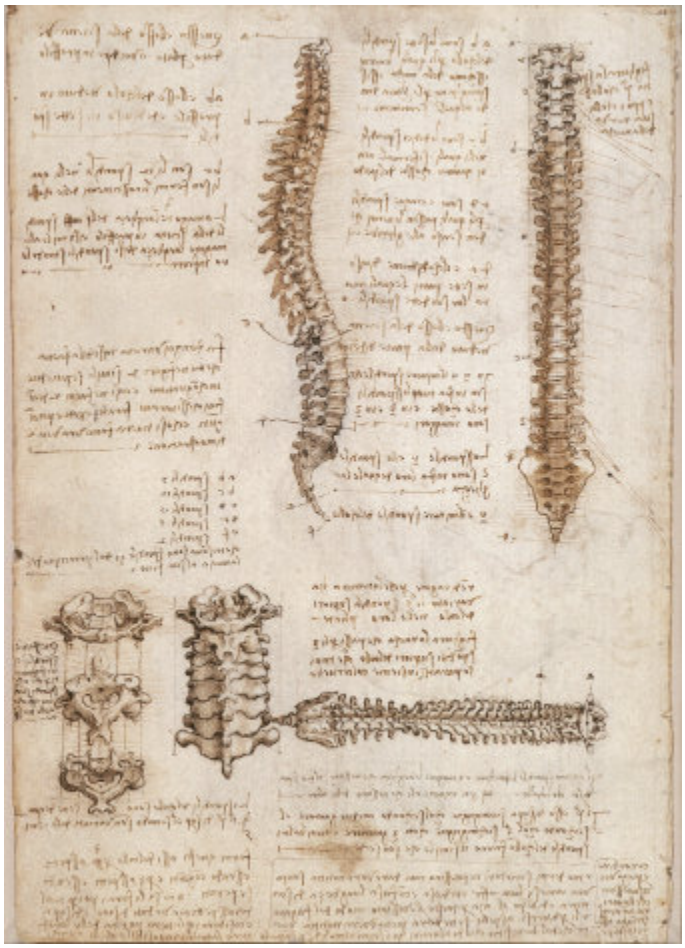
1. *Andrea del Verrocchio e Leonardo da Vinci, O Batismo de Cristo, c. 1470-1475, Galleria degli Uffizi, Florença.*

2. *Estrela de Belém (ornitogallo), c. 1508, Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos de Água, fólio 16r.*

3. *A Virgem do Rochedo, c. 1483-1486, Paris, Museu do Louvre.*

4. *O Homem Vitruviano, c. 1490, Gallerie dell'Accademia, Veneza.*

5. *A Virgem e o Menino com Santa Ana, c. 1508-1515, Museu do Louvre, Paris.*



6. *A coluna vertebral, c. 1509-1510, Estudos Anatômicos, fólio 139v.*

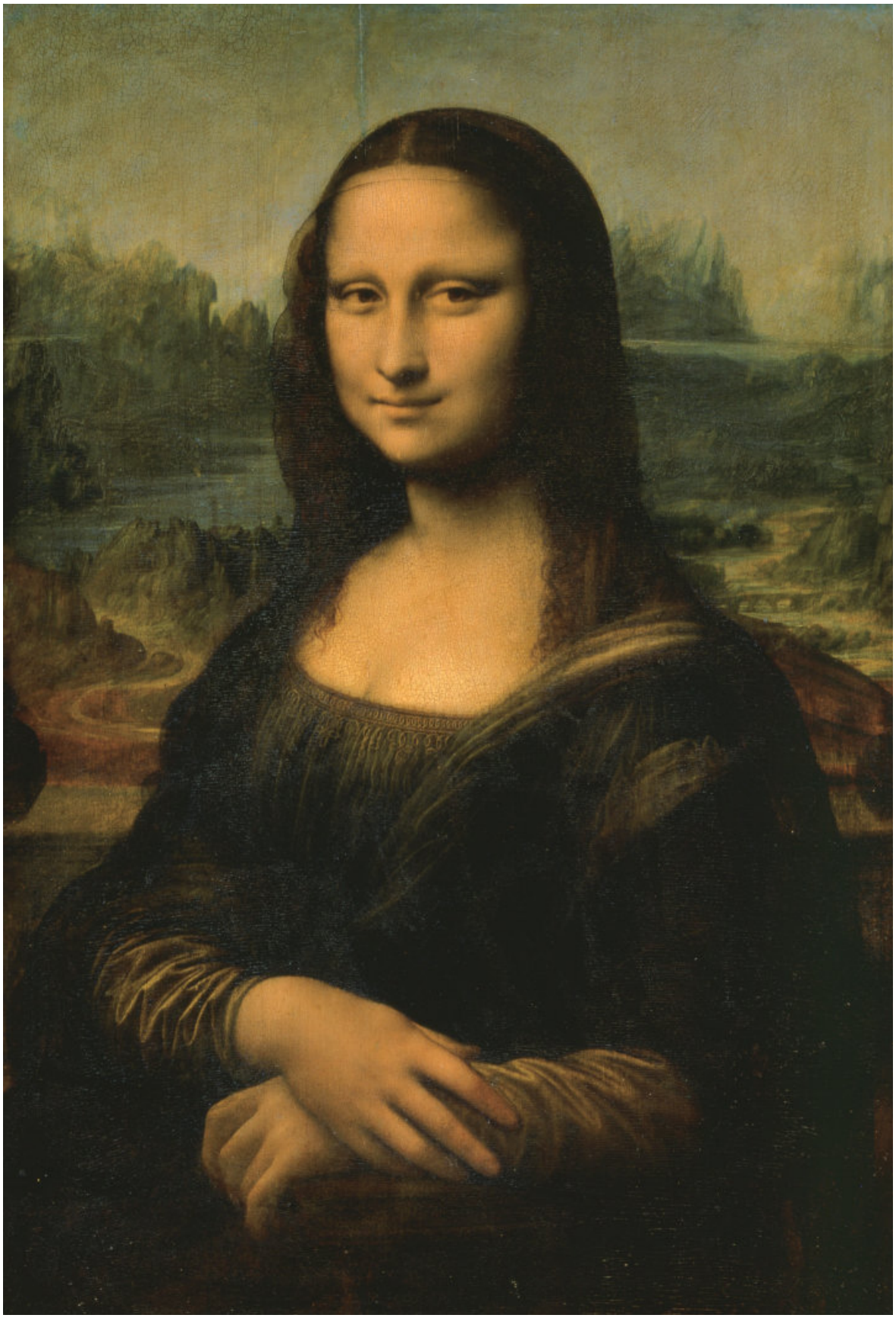
7. Visões sequenciais dos músculos do ombro e do braço, c. 1509-1510, Estudos Anatômicos, fólio 141v.

8. *Estudo da rotação do braço, c. 1509-1510, Estudos Anatômicos, fólio 135v.*

9. *O coração e seus vasos sanguíneos, c. 1513, Estudos Anatômicos, fólio 166v.*

10. *O feto no ventre materno, c. 1510-1512, Estudos Anatômicos, fólio 198r.*

11. *Leda e o Cisne* (*Spiridon Leda*), *c. 1503-1515, Galleria degli Uffi zi.*



12. *Mona Lisa, c. 1503-1515, Paris, Museu do Louvre.*

Notas

INRODUÇÃO

1. Ver pp. 368ss para uma cronologia da vida e das obras de Leonardo.
2. Ms. E, fólio 55r.
3. Ver Capra, Fritjof. *The Science of Leonardo*, Doubleday Broading Publishing Group, Nova York (2007), pp. 158-59, para uma discussão mais pormenorizada do moderno método científico. [*A Ciência de Leonardo da Vinci*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 2008, pp. 172-74.]
4. Ver Capra (2007), pp. 155-56. (ed. br., 2008, pp. 169-
5. 71.) Codex Atlanticus, fólio 327v.
6. Ver Capra (2007), pp. 133ss. (ed. br., 2008, pp.
7. 148ss.) Uma lista das edições críticas dos cadernos de notas de Leonardo é dada nas pp. 411ss.
8. Ver Capra (2007), pp. 160ss. (ed. br., 2008, pp.
9. 174ss.) Ver pp. 323ss.
10. Ver p. 50.
11. Ver Capra (2007), pp. 26-7. (ed. br., 2008, pp. 49-51.)
12. *Ibid.*, capítulos 8 e 9. (ed. br., 2008, capítulos 8 e 9.) Ms. A, fólio 3r.

Ver Capra (2007), pp. 249ss. (ed. br., 2008, pp. 222ss.) Ms. Ashburnham, fólio 19v.
16. *Trattato della pittura*, capítulos 6 e 12.
17. Ver Capra (2007), p. 52. (ed. br., 2008, p. 73.) Ver pp. 86ss.
19. Ms. G, fólio 96v.
20. Ver Capra (2007), capítulo 7. (ed. br., 2008, capítulo 7.) Ver Capra (2007), p. 151. (ed. br., 2008, pp. 165-66.) *Ibid.* (1996), pp. 112ss.
24. *Ibid.* (2007), pp. 208ss. (ed. br., 2008, pp. 219ss.) Ver p. 61.
25. Codex Forster III, fólio 43v.
26. Ver Capra (1996), pp. 128ss.
27. *Trattato*, capítulo 501.

CAPÍTULO 1: OS MOVIMENTOS DA ÁGUA

1. Ms. K, fólio 2r.
2. Para um breve registro da extensão, história e localização dos cadernos de notas de Leonardo, ver Capra (2007), pp. 133ss. (ed. br., 2008, pp. 148ss). Uma lista das modernas edições fac-similares e das transcrições críticas é dada nas pp. 411ss.
3. Uma cópia do manuscrito original está hoje na Coleção Vittorio Emanuelle, Biblioteca Nazionale Centrale, Roma.
4. Ms. C, fólio 26v.
5. Codex Arundel, fólio 210r.
6. *Ibid*.
7. Ver pp. 36-7; ver também Capra (2007), p. 99. (ed. br., 2008, p. 177.) Codex Arundel, fólio 57v.
9. *Ibid*.; ver também Keele (1983), p. 89.

10. Ver pp. 327-28.
11. Ver Capra (2007), p. 77. (ed. br., 2008, pp. 96-7.) Ver Kemp (1981), pp. 94-6; ver também Capra (2007), pp. 47-9. (ed. br., 2008, pp. 69-71.) Ver pp. 86ss.
12. Ver pp. 125ss.
13. Ver pp. 315ss.
14. Ver Capra (2007), pp. 106-08. (ed. br., 2008, pp. 122-23.) *Ibid.*, p. 177. (ed. br., 2008, p. 190.)
15. Ms. G, fólio 93r.
16. Codex Atlanticus, fólio 171r.
17. Codex Arundel, fólio 57v.
18. Ver p. 64.
19. Ver Capra (1996), pp. 169ss.
20. Ver pp. 317ss.
21. Ver Capra (2007), p. 111. (ed. br., 2008, p. 128.) Ver Codex Atlanticus, fólio 785br.
22. Ver p. 47.
23. Ver Blamly (1991), p. 335.
24. Codex Atlanticus, fólio 302.
25. Ver Capra (2007), p. 115. (ed. br., 2008, p. 177.) Ms. A, fólio 26r.
26. Codex Arundel, fólio 57v.
27. Ms. A, fólio 56v.
28. Ver Capra (1996), pp. 5-6.
29. *Ibid.* (2007), p. 146. (ed. br., 2008, p. 161.) Ver pp. 74 ss.
30. Ver Capra (1996), pp. 100ss.
31. *Ibid.* (2002), pp. 81-2.
32. Codex Leicester, fólio 33v.
33. Ms. H, fólio 77r.
34. Codex Arundel, fólio 235r.
35. Codex Atlanticus, fólio 468.
36. Ver Kemp (1982).

43. Ms. A, fólio 56r.
44. *Ibid*.
45. Ver Keele (1983), p. 81.
46. Codex Leicester, fólio 28r.
47. Ver Capra (2007), p. 77. (ed. br., 2008, p. 97.) Codex Leicester, fólio 3v.
49. *Ibid.*, fólio 34v.
50. *Ibid.*, fólio 32v.
51. Estudos Anatômicos, fólio 137r.
52. Ms. G, fólio 48v. A frase “as nuvens, origem dos rios” parece, aqui, um simples comentário de passagem. No entanto, conforme as sinalou Augusto Marinoni em sua transcrição do Ms. G, Leonardo destacou-a com um traço especial de sua pena, para realçar-lhe a importância.
53. Ver Capra (2007), pp. 168-69. (ed. br., 2008, pp. 182-
54. 83.) Ver pp. 319ss.
55. Ver pp. 317ss.
56. Ver pp. 137ss.
57. Ver pp. 58-59.
58. Ver Emboden (1987), p. 24.
60. Ver Capra (2007), pp. 83ss. (ed. br., 2008, pp. 102ss.) Ver Macagno (1987).
61. Ver Zammattio (1974).
62. Codex Leicester, fólio 15v.
63. Ms. F, fólio 2v.
64. Macagno (1986), pp. 4-5.
65. Ver Arasse (1998), p. 130; ver também Capra (2007),
66. p. 91. (ed. br., 2008, pp. 107-08.) Ms. A, fólio 61r; ver
67. também Capra (2007), p. 230. (ed. br., 2008, p. 238.) Codex Atlanticus, fólio 506r.
68. *Ibid.*, fólio 299r. A rigor, a água também é compressível, mas as pressões necessárias para obter mudanças significativas de volume são tão grandes

que, para todos os fins práticos, podemos considerá-la incompressível.

69. Ver Macagno (1987).
70. Ver Capra (2007), pp. 161ss. (ed. br., 2008, pp.
71. 174ss.) A rigor, a mecânica dos fluidos é o estudo dos fluidos (gases e líquidos) estáticos ou em movimento; a dinâmica dos fluidos, o estudo dos fluidos em movimento; a hidrodinâmica, o estudo da água em movimento; e a hidráulica (termo mais usado em engenharia), o estudo dos problemas pertinentes à água, tanto estática quanto em movimento.
72. Ver, por exemplo, Moin e Kim (1997).
73. Para uma revisão dos conceitos e técnicas básicas da dinâmica não linear, ver Capra (1996), pp. 112ss.
74. Ver Davidson (2004), pp. 23-4.
75. Ver Sabersky *et al*. (1999), p. 4.
76. Ver Capra (2007), pp. 229ss. (ed. br., 2008, pp.
77. 236ss.) Ms. F, fólio 87v.
78. Ver Capra (2007), p. 231. (ed. br., 2008, p. 239.) *Ibid.*, p. 96. (ed. br., 2008, p. 114.)
80. Ver Arasse (1998), p. 380.
81. Ver Capra (2007), p. 229. (ed. br., 2008, p. 238.) *Ibid.*, p. 109. (ed. br., 2008, p. 126.)
83. Ms. F, fólio 13r.
84. Codex Leicester, fólio 27r.
85. Ms. I, fólio 115r.
86. Ms. F, fólio 34v.
87. Ms. K, fólio 1r.
88. Ver Merzkirch (1987).
89. Ms. G, fólio 10r.
90. Codex Atlanticus, fólio 465.
91. Codex Trivulzianus, fólio 31r.
92. Ver Keele (1983), pp. 135-36.
93. Codex Leicester, fólio 26v.

94. Ver Capra (2007), pp. 148-49. (ed. br., 2008, pp. 163-
95. 64.) Codex Leicester, fólio 26v.
96. Ver p. 182.
97. Ms. K, fólio 101v.
98. Ver pp. 200ss.
99. Ver pp. 224ss.
100. Ms. M, fólio 42v.
101. Ms. I, fólio 68r.
102. Ver pp. 214ss.
103. Codex Leicester, fólio 25r.
104. Ms. H, fólio 55.
105. Ms. I, fólio 106r.
106. Ver Fasso (1987).
107. Ver Capra (2007), p. 198. (ed. br., 2008, p. 209.)
108.
109. *Ibid.*, pp. 199ss. (ed. br., 2008, pp. 209ss.) Ver pp. 46-7.
110. Ver Fasso (1987).
111. Ms. F, fólio 16r.
112. Codex Atlanticus, fólio 1018r.
113. Ms. A, fólio 57r.
114. *Ibid.*, fólio 57v.
115. Ver Capra (2007), p. 158. (ed. br., 2008, p. 172.) Ver
116. Fasso (1987).
117. Redemoinhos são vórtices pequenos; “vórtice” é o termo científico para todo fluido que apresenta movimento rodopiante ou giratório. Leonardo usa várias palavras para os vórtices de água, como *retroso* (contrafluxo), *revertigine* (fluxo reverso), *volta revertiginosa* (volta reversa), *moto cocleare* (movimento espiralado) e *voragine* (concavidade).
118. Ver pp. 36-7.
119. Ms. A, fólio 60r.
120. Agradeço ao prof. Ugo Piomelli, especialista em dinâmica dos fluidos na Universidade de Maryland,

por esta e outras observações sobre os desenhos e descrições de fluxos turbulentos de Leonardo.

121. Na moderna dinâmica dos fluidos, os vórtices circulares são conhecidos como rotacionais e os espiralados, como irrotacionais.
122. Codex Atlanticus, fólio 813.
123. Ms. F, fólio 13v.
124. Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 46r.
125. Piomelli, comunicação pessoal, fevereiro de 2005.
126. Ver pp. 49ss.
127. Ms. F, fólio 3r.
128. Em física, o impulso angular de um corpo em rotação se relaciona com a força necessária para superar sua inércia rotacional.
129. Ver Davidson (2004), pp. 17ss.
130. Ver pp. 50-1.
131. Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 48r.
132. No início dos anos 1990, as afirmações de Leonardo chamaram a atenção do especialista em dinâmica dos fluidos Ugo Piomelli, que ressaltou sua importância a muitos colegas na época; Piomelli, comunicação pessoal, 2005.
133. Ms. I, fólio 78r.
134. Ver p. 68.
135. Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 42r.
136. Ver Capra (1996), pp. 133-34.
137. Ver p. 48-49.
138. Ver pp. 215ss.
139. Ver Giacomelli (1953).
140. Ver Zöllner e Nathan (2003), pp. 526-35.

141.Ver Capra (2007), pp. 125-26. (ed. br., 2008, pp. 140-142.42.) Ver pp. 36-37.
143.Ver p. 119.
144.Arasse (1998), p. 419.

CAPÍTULO 2: A TERRA VIVA

1. Ver Gould (1998).
2. Ms. A, fólio 55v.
3. *Ibid*.
4. Codex Leicester, fólio 34r.
5. Leonardo emprega o termo aristotélico *anima vegetativa* (“alma vegetativa”) para descrever a força vital tradicionalmente considerada fonte de toda a vida; ver Capra (2007), pp. 147-48. (ed. br., 2008, pp.
6. 161-64.) Codex Leicester, 34r.
7. Ver pp. 39-40.
8. Ver pp. 317ss.
9. Ver pp. 137-38.
10. Ver Capra (1996), pp. 100ss.
11. Lovelock (1991), pp. 31ss.
12. Kemp (1989).
13. Wicander e Monroe (1995), p. 7.
14. Ver p. 47.
15. Ms. E, fólio 4v.
16. Ms. F, fólio 11v.
17. Codex Atlanticus, fólio 901r.
18. Codex Leicester, fólio 10r.
19. A estratigrafia, ramo da geologia que estuda as camadas ou estratos de rochas, teve por precursor, no século XVII, o anatomista e geólogo dinamarquês

Nicolas Steno (Niels Stensen); ver Gohau (1991), pp. 61ss.

20. Codex Leicester, fólio 6v.
21. Gould (1998).
22. Codex Atlanticus, fólio 508v.
23. Ver Capra (2007), p. 163. (ed. br., 2008, p. 177.) *Ibid.*, p. 111. (ed. br., 2008, p. 126.)
24. *Ibid.*, pp. 209-10. (ed. br., 2008, pp. 219-21.) *Ibid.*, pp. 109-10. (ed. br., 2008, pp. 126-29.) Ver Arasse (1998), p. 217.
25. Codex Leicester, fólio 10r.
26. Codex Arundel, fólio 138r.
27. Codex Leicester, fólio 31r; essa passagem aparece na minuciosa análise que Leonardo fez dos fósseis; ver pp. 96ss.
28. Ver Gohau (1991), pp. 139ss.
29. Codex Atlanticus, fólio 1040v.
30. Codex Arundel, fólio 30v.
31. Ver Gohau (1991), p. 139.
32. Martin Kemp *in* Kemp e Roberts (1989), p. 108.
33. Ver Capra (2007), pp. 85-6. (ed. br., 2008, pp. 104-05.) Ver Kemp (1981), pp. 94-6.
34. Pizzoruso (1996).
35. Ver Wicander e Monroe (1995), pp. 57ss.
36. Entre os geólogos europeus, a diábase é mais conhecida como dolerito e, comercialmente, como “granito negro”.
37. Pizzorusso (1996).
38. Ver Capra (2007), p. 85. (ed. br., 2008, p. 104.) Pizzorusso (1996).
39. Emboden (1987), pp. 125ss; ver também p. 114.
40. Codex Leicester, fólio 10r.
41. Ver Kemp (1981), p. 312.
42. Codex Leicester, fólio 9v.

48. Ms. F, fólio 80v.
49. Codex Leicester, fólio 10r.
50. *Ibid.*
51. *Ibid.*, fólio 8v.
52. *Ibid.*, fólio 9v.
53. *Ibid.*, fólio 10r.
54. *Ibid.*, fólio 8v; 1 *braccio* equivale aproximadamente a 61 cm.
55. *Ibid.*, fólio 9r.
56. *Ibid.*, fólio 10r.
57. Gould (1998), p. 25.
58. Ellenberger (1996), p. 101.
59. Kemp (1999).
60. Ms. F, folio 80r.
61. *Ibid.*, folios 79r, 79v e 80r.
62. *Ibid.*, fólio 79v.
63. Ver Gohau (1991).
64. Ver Capra (2007), p. 156. (ed. br., 2008, p. 170.) *Ibid.*, p. 139. (ed. br., 2008, p. 154.)
65. *Ibid.*, p. 155. (ed. br., 2008, p. 170.)
66. A rigor, o centro da Terra consiste de um pequeno núcleo interior sólido e de um núcleo derretido, maior.
67. Ver Gohau (1991), pp. 20-1.
68. Os antigos acreditavam que 36 mil anos fossem o período de precessão do eixo da Terra, que podiam observar com base no movimento das posições dos equinócios ao longo da eclíptica relativa às estrelas fixas. O número atual é de aproximadamente 25.800 anos. Os períodos de tempo geológico, ao contrário, são medidos em milhões de anos.
69. Ver Kemp (1981), p. 314.
70. Codex Arundel, fólio 19r.
71. Ms. F, fólio 62v.

73. Ver pp. 109ss.
74. Codex Leicester, fólio 35v.
75. Na ciência moderna, o termo “centro de massa” é usado em lugar de “centro de gravidade”, empregado por Leonardo e ainda hoje, coloquialmente.
76. Gould (1998), p. 39.
77. Ms. E, fólio 4v.
78. Codex Atlanticus, fólio 350.
79. Ms. F, fólio 70r.
80. O atual ciclo rochoso é mais complexo, pois envolve diversos processos adicionais que resultam em transformações cíclicas de rochas ígneas, se dimentares e metamórficas umas nas outras; ver Wicander e Monroe (1995), p. 10.
81. Ver p. 38.
82. Codex Leicester, fólio 36r.
83. Ver Gohau (1991), p. 143.
84. Ver Wicander e Monroe (1995), pp. 8-10.
85. Ver Gohau (1991), p. 145.
86. Ver Capra (2007), pp. 109ss. (ed. br., 2008, pp.
87. 126ss.) Ellenberger (1996), vol. I, p. 96.
88. Codex Leicester, fólio 8v.
89. *Ibid.*, fólio 9r.
90. Ver Gravuras 5 e 12.

CAPÍTULO 3: O CRESCIMENTO DAS PLANTAS

1. Partes deste capítulo foram publicadas em separado no livro *Leonardo’s Botany: A Discourse on the Science of Qualities*; ver Capra (2008).
2. Ver Emboden (1987).

3. Ver cronologia da vida e das obras de Leonardo, pp. 368ss.
4. Ver Emboden (1987), p. 77.
5. *Ibid.*, p. 131.
6. *Ibid.*, p. 139.
7. Ver pp. 81-2.
8. Ver Brown (1994).
9. Ver Ames-Lewis (1999).
10. Ver p. 357.
11. Um segundo estudo para a Leda ajoelhada, hoje na Devonshire Collection, Chatsworth, também tem forma espiral.
12. Codex Atlanticus, fólio 888r.
13. Ver p. 96.
14. Ver pp. 98-99.
15. Ver Emboden (1987), p. 125.
16. *Ibid.*, pp. 127ss.
17. Ver p. 122.
18. Ver Emboden (1987), p. 126.
19. Ver p. 96.
20. Ver pp. 94-5.
21. Ver Emboden (1987), pp. 109 e 132.
22. Ver Richter (1970), vol. I, pp. 203ss.
23. Codex Arundel, fólio 114v.
24. Ms. G, fólio 8r.
25. Ver Emboden (1987), p. 101.
26. Coleção Windsor, Paisagens, Plantas e Estudos da Água, fólio 8v.
27. Ver Emboden (1987), p. 116.
28. Ver Capra (2007), pp. 61-3. (ed. br., 2008, pp. 82-4.)
29. Ver Roberts (1989).
30. Ver Emboden (1987), p. 141.

32. Ver Capra (2007), p. 152. (ed. br., 2008, p. 166.) Ver Emboden (1987), p. 82.
33. *Ibib.*, p. 84.
34. *Ibid.*, p. 86.
35. *Ibid.*, p. 87.
36. Ver Capra (2007), p. 141. (ed. br., 2008, p. 156.) Ver Emboden (1987), p. 88.
38. *Ibid.*, p. 89.
39. Ver Capra (2007), pp. 155-56. (ed. br., 2008, pp. 169-
40. 71.) Codex Atlanticus, fólio 323r.
41. Ver Emboden (1987), p. 174.
42. Ver Capra (2007), p. 131. (ed. br., 2008, p. 146.) Ver Emboden (1987), p. 24.
44. Coleção Windsor, Estudos Anatômicos, fólio 117r.
45. Ver Emboden (1987), p. 171.
46. Ver Capra (1996), pp. 21ss.
47. Ver Capra (1996), pp. 18ss.
48. Ver Emboden (1987), p. 165.
49. Ver p. 81.
50. Ms. G, fólio 16v.
51. *Trattato*, Capítulo 822.
52. O princípio é conhecido pelos botânicos como inflorescência determinada *versus* indeterminada; ver Emboden (1987), p. 170.
53. Ms. G, fólio 16v.
54. Ms. G, fólio 33v.
55. *Ibid.*, fólio 17r.
56. Ver Emboden (1987), p. 173.
57. *Ibid.*
58. Ms. I, fólio 12v.
59. Ver pp. 63-64.
60. Ver Laurenza (2006d).
61. Ver Emboden (1987), p. 110; e também Eloy (2011).

62. Ms. G, fólio 32v.
63. *Ibid*.
64. Ver Emboden (1987), p. 168.
65. *Ibid*.
66. Ms. G, fólio 35v.
67. *Trattato*, capítulo 832.
68. Ver Emboden (1987), p. 173.
69. *Trattato*, capítulo 838.
70. *Ibid*.
71. Ver Emboden (1987), p. 172.
72. *Trattato*, capítulo 842.
73. *Ibid.*
74. Ver Emboden (1987), p. 169.
75. *Trattato*, capítulo 839.
76. Ver Emboden (1987), p. 169.
77. Codex Atlanticus, fólio 207r.
78. Ver Emboden (1987), p. 172.
79. Ms. B, fólio 17v.
80. Ver Emboden (1987), p. 172.
81. Ms. G, fólio 1r.
82. *Trattato*, capítulo 841.
83. Ver Emboden (1987), p. 169.
84. Ver Capra (2007), pp. 114-15. (ed. br., 2008, pp. 98-
85. 9.) Estudos Anatômicos, fólio 196v.
86. Ver Emboden (1987), p. 171.
87. Ver p. 352-53.
88. Ver Bottazzi (1956), p. 387.

CAPÍTULO 4: A FIGURA HUMANA

1. Ver p. 84.

2. Para uma detalhada cronologia recente das pesquisas de Leonardo em anatomia, inclusive várias datações e interpretações novas, ver Laurenza (2009).
3. 4. Ver Capra (2007), p. 216. (ed. br., 2008, p. 225.) Ver Keele (1983), pp. 64-5.
5. Ver Capra (2007), pp. 212ss. (ed. br., 2008, pp.
6. 222ss.) Estudos Anatômicos, fólio 153r.
7. Ver p. 219.
8. Estudos Anatômicos, fólio 154r.
9. 10. Ver Capra (2007), p. 115. (ed. br., 2008, p. 132.) Estudos Anatômicos, fólio 143r.
11. Ver capítulo 2.
12. Vale notar que uma grande compaixão pelos animais impediu Leonardo de praticar a vivissecção.
13. Ver pp. 281ss.
14. Ver Capra (2007), pp. 117-18. (ed. br., 2008, pp. 134-
15. 35.) Estudos Anatômicos, fólio 81v.
16. Ver Laurenza (2009), pp. 74-7.
17. 18. Ver Capra (2007), p. 95. (ed. br., 2008, p. 113.) Ver Zöllner e Nathan (2003), p. 384.
19. A seção áurea (também chamada de “razão áurea” ou “proporção divina”) foi definida por Euclides como a divisão de um segmento de reta em duas partes, de maneira tal que a razão entre a reta total e a parte maior seja igual à razão entre a parte maior e a menor. Na Renascença, a seção áurea era considerada a proporção mais agradável aos olhos, e muitos artistas e arquitetos incorporaram razões áureas aproximadas às suas obras; ver Livio (2002).
20. Para uma coletânea abrangente dos desenhos de proporção de Leonardo, ver Zöllner e Nathan (2003), pp. 248ss.
21. Ver Ackerman (1969).

22. Os variados estudos que Leonardo fez de cavalos estão reunidos num volume especial da Royal Collection no Castelo de Windsor; ver p. 291.
23. Ver Laurenza (2006a).
24. Ver Zöllner e Nathan (2003), p. 348.
25. Ver Laurenza (2006a), p. 153.
26. As quatro unidades de comprimento definidas por Vitrúvio e expressas em termos de frações com denominadores pares correspondem ao sistema duodecimal em uso na Europa até a introdução do metro no século XIX; ver Zöllner e Nathan (2003), p. 348. O côvado era uma antiga unidade de comprimento igual ao comprimento do antebraço e da mão.
27. Fólio Veneziano.
28. Ver Capra (2007), pp. 163-64. (ed. br., 2008, pp. 177-
29. 78.) Ver Laurenza (2006b), p. 158.
30. *Ibid.*
31. No desenho de Leonardo, a relação entre círculo e quadrado é determinada pela posição do umbigo, que divide a altura da figura aproximadamente na proporção da seção áurea. É improvável, porém, que Leonardo haja de fato construído dessa maneira o círculo a partir do quadrado. Em 1490, seu domínio da geometria euclidiana não era completo o bastante para permitir semelhante operação. Além disso, seu ponto de partida foi o corpo, não uma construção geométrica; ver Laurenza (2006b).
32. Ver Laurenza (2006a).
33. Ver Capra (2007), pp. 205ss. (ed. br., 2008, pp.
34. 217ss.) *Trattato*, capítulo 21.
35. Ver Laurenza (2006a); p. 155.
36. Ver O'Malley e Saunders (2003), p. 456.

37. Ver Johannes Nathan *in* Zöllner e Nathan (2003), p. 402.
38. Ver Laurenza (2003).
39. Ver Capra (2007), p. 154. (ed. br., 2008, p. 168.) *Ibid.*
40. *Ibid.*, p. 169.
41. Ver pp. 245 para uma discussão mais detalhada desse desenho.
42. Ver Laurenza (2003a), pp. 73ss.
43. Ver Saunders e O'Malley (1959).
44. *Ibid.*, p. 28.
45. Ver Laurenza (2003a), pp. 82ss.
46. Em resposta ao poderoso ideal renascentista de representações compostas harmoniosas, Vesálio decidiu acrescentar algumas imagens compostas, sintéticas, num apêndice (*Epitome*) à *Fabrica*. Entretanto, como salienta Laurenza, também aí a ordem das pranchas é analítica, dos níveis superficiais aos mais profundos. A ênfase primária é sempre na separação e dissecção; ver Laurenza (2003a), pp. 91-2.
47. *Ibid.*, p. 85.
48. *Ibid.*, p. viii.
49. Ver Capra (2007), pp. 3ss. (ed. br., 2008, pp. 27ss.) Ver Laurenza (2003a), p. ix.
50. Estudos Anatômicos, fólios 173r e 77r.
51. Estudos Anatômicos, fólio 173r.
52. *Ibid.*, fólio 156v.
53. *Ibid.*, fólio 173r.
54. Ver Capra (2007), p. 12. (ed. br., 2008, p. 35.

CAPÍTULO 5: OS ELEMENTOS DA MECÂNICA

1. Ver pp. 56ss.
2. Ver pp. 83ss.
3. Ver pp. 109ss.
4. Ver pp. 243ss.
5. Ver p. 155.
6. Ver Capra (2007), pp. 91-2. (ed. br., 2008, pp. 109-
7. 10.) Codex *Sul Volo*, fólio 3r.
8. Ver, p. ex., Keele (1983), pp. 252 e 267.
9. Galluzzi (1996), p. 226.
10. Ver p. 157.
11. Ver Capra (1982), pp. 60ss.
12. Estudos Anatômicos, fólio 114v.
13. Ver p. 177.
14. Capra (2007), pp. 249ss. (ed. br., 2008, pp. 256ss.)
15. Estudos Anatômicos, fólio 153r.
16. Codex Atlanticus, fólio 434r.
17. Estudos Anatômicos, fólio 114v.
18. *Ibid.*, fólios 179v e 148v.
19. Ms. H, fólio 95r.
20. Codex Leicester, fólio 17v.
21. Ver a descrição de Leonardo da Terra viva, p. 73.
22. Ver Capra (2007), pp. 34ss. (ed. br., 2008, pp. 57ss.)
23. Ver *ibid.*, pp. 89ss. (ed. br., 2008, pp. 107-08.) Codex
24. Atlanticus, fólio 21r.
25. Ver Capra (2007), p. 163. (ed. br., 2008, p. 178.) Ver
26. Bedini e Reti (1974).
27. Ver pp. 46-47.
28. Ver pp. 37-38.
29. Ver Capra (2007), pp. 102 e 107. (ed. br., 2008, pp.
30. 120 e 124-25.) Ver Bramly (1991), p. 342.
31. Capra (2007), pp. 22ss. (ed. br., 2008, pp. 44ss.) Ver
32. Capra (2007), pp. 25-6. (ed. br., 2008, pp. 48-9.)
33. Galluzzi (1996).

34. Galluzzi (1987).
35. Ver, por exemplo, Kemp e Roberts (1989), pp. 218-41; ver também Dibner (1969; Dibner (1974); Pedretti (1999); Laurenza, Taddei e Zanon (2005).
36. Ver Kemp (1981), p. 88.
37. Ver Clark (1993), p. 110.
38. Ver Capra (2007), pp. 191ss. (ed. br., 2008, pp. 217ss.) Ver *Ibid.*, p. 91. (ed. br., 2008, p. 110.) Ver Reti (1974).
39. Ver p. 178.
40. Ver Reti (1974).
41. Para uma descrição detalhada do funcionamento dessa máquina, ver Dibner (1969).
42. Ver Moody e Clagett (1952).
43. Ms. E, fólio 8v.
44. Codex Atlanticus, fólios 416v, 499 e 450.
45. *Ibid.*, fólio 481r.
46. Codex Arundel, fólio 1v.
47. Ver Clagett (1999).
48. Ver Capra (2007), p. 150. (ed. br., 2008, pp. 164-65.) Codex Madri I, fólio 181r; Codex Madri II, fólio 80r.
49. *Ibid.*, fólio 123v; ver também Codex Forster II, fólio 65v.
50. Codex Leicester, fólio 6r.
51. *Ibid.*, fólio 26v; ver p. 45 para uma discussão mais detalhada da visão da gravidade de Leonardo.
52. Ver Macagno (1982).
53. Ver Fasso (1987).
54. Codex Madri I, fólio 169r.
55. *Ibid.*, fólio 148v.
56. Codex Leicester, fólio 6r.
57. *Ibid.*, fólio 11r.
58. Codex Atlanticus, fólio 589v.

62. Ver Fasso (1987).
63. Ver Bertoloni-Meli (2006), p. 60.
64. Ver Capra (2007), pp. 149-50. (ed. br., 2008, pp. 164-
65. 65.) Ms. I, fólio 130v.
66. Ver p. 56.
67. Codex Madri I, fólio 128v.
68. Ver Capra (2007), pp. 193ss. (ed. br., 2008, pp.
69. 204ss.) Codex Atlanticus, fólio 407r.
70. Ver Bertoloni-Meli (2006), p. 72.
71. Ver Capra (2007), p. 195. (ed. br., 2008, pp. 206-07.) Ver Bibliografia, pp. 415ss, para uma lista completa das edições críticas dos cadernos de notas de Leonardo.
73. Codex Atlanticus, fólio 421v.
74. Codex Arundel, fólio 37v.
75. *Ibid.*, fólio 176.
76. Codex Atlanticus, fólio 1098r.
77. *Ibid.*, fólio 215r.
78. Ms. E, fólio 42r.
79. Ver pp. 80ss.
80. Ms. E, fólio 36r. A velocidade angular de uma roda giratória é a taxa de mudança do ângulo de giro dessa roda; é a mesma para cada ponto da roda. A velocidade linear de qualquer ponto da roda é sua velocidade tangencial, que está na proporção direta de sua distância do eixo de rotação.
81. Ver p. 64.
82. Codex Atlanticus, fólio 813.
83. Ms. I, fólio 99v.
84. Estudos Anatômicos, fólio 115v; ver também Ms. E, fólio 29r.
85. Codex Atlanticus, fólio 362r.
86. Citado em Bertoloni-Meli (2006), p. 1.
87. Ms. A, fólio 21v.

88. Ver p. 109.
89. Codex Trivulzianus, fólio 43r.
90. Ms. A, fólio 61r; ver Capra (2007), p. 230. (ed. br.,
91. 2008, p. 238.) Ms. G, fólio 73r.
92. Ver Clagett (1999).
93. Ver pp. 56ss.
94. Codex Leicester, fólio 29v.
95. Ms. E, fólio 29r.
96. Ver Bertoloni-Meli (2006), p. 64.
97. Isso corresponde à moderna definição de energia cinética, $E_c = ½ mv^2$.
98. Ver Bertoloni-Meli (2006), pp. 297-98.
99. Ver Capra (2007), pp. 200ss. (ed. br., 2008, pp.
100. 211ss.) Ms. M, fólio 66v.
101. Ver pp. 58-59.
102. Ver Keele (1983), p. 37.
103. Codex Madri I, fólio 134v.
104. Ver Fasso (1987) para detalhes desse cálculo; se levássemos em conta a viscosidade (atrito) da água, o cálculo seria mais complicado.
105. Ver Reti (1971).
106. Ver *Ibid.*
107. Codex Forster II, fólios 86r e 87r.
108. Codex Madri I, fólio 95r.
109. Ver pp. 61ss.
110. Codex Leicester, fólio 25r; ver p. 46.
111. Ver pp. 281ss.
112. Ms. E, fólio 54r.
113. Codex Atlanticus, fólio 407r.
114. Ms. G, fólio 1r; ver também Codex Leicester, fólio 29v.
115. Codex Atlanticus, fólio 398v.
116. Codex Madri I, capa.

117. Ver Capra (1982), pp. 72ss.
118. Ver p. 83.
119. Codex Atlanticus, fólio 508v; ver p. 73.
120. Codex Arundel, fólio 176r.
121. Codex Atlanticus, fólio 195r.
122. Ver Laurenza (2006c).
123. Ver pp. 189ss.
124. Codex Atlanticus, fólio 257r.
125. Ver p. 192.
126. Codex Atlanticus, fólio 1060r.
127. Ver pp. 243ss.
128. Ver Clagett (1999) para uma discussão mais aprofundada dos trabalhos de Leonardo sobre os centros de gravidade.
129. Codex Arundel, fólio 218v.
130. *Ibid.*, fólio 193v.
131. Ver p. 209.
132. Codex Atlanticus, fólio 480r.
133. Ver Capra (2007), pp. 193 ss. (ed. br., 2008, pp. 218ss); ver também p. 206.
134. Ms. M, fólio 59v.
135. *Ibid.*, fólio 45r.
136. Ver Kline (1972), p. 338.
137. Ms. M, fólio 42v.
138. Ms. M, fólio 44v.
139. Ver p. 215.
140. Ver Bertoloni-Meli (2006), p. 76.
141. Ver Bedini e Reti (1974).
142. Codex Madri I, fólio 147r.
143. Ver Capra (2007), p. 106. (ed. br., 2008, p. 123.)
144. Codex Atlanticus, fólio 132r.
145. Ver Dibner (1974).
146. Ms. C, fólio 7r.

147. Ver Bertoloni-Meli (2006), pp. 135ss.
148. Citado *Ibid.*, p. 302.
149. Ver Capra (2007), pp. 244ss. (ed. br., 2008, pp.
150. 252ss.) Codex Atlanticus, fólio 826r.
151. *Ibid.*.
152. Ver pp. 185-86.
153. Ms. F, fólio 26r.
154. Ms. A, fólio 24r.
155. Codex Atlanticus, fólio 1058v; *c.* 1485.
156. *Ibid.*, fólio 479r; ver também Ms. F, fólio 37v; Codex Atlanticus, fólio 571r.
157. Ms. G, fólio 75r.
158. Codex Atlanticus, fólio 949v.
159. O princípio de Hamilton estabelece que qualquer sistema mecânico pode ser representado por uma certa quantidade matemática, chamada “esforço” (*action*), que permanece estacionária sob pequenas variações das variáveis do sistema. A formulação matemática do princípio equivale às equações do movimento de Newton.
160. Ms. A, fólio 34v.
161. *Ibid.*, fólio 53v.
162. Codex Atlanticus, fólio 973v.
163. *Ibid.*, fólio 1014v.
164. Ver Capra (2007), pp. 233-34. (ed. br., 2008, p. 242.)
165. Ms. A, fólio 22v.
166. Ver Capra (2007), pp. 228ss. (ed. br., 2008, pp.
167. 237ss.) Ms. M, fólios 52r e 52v; Codex Madri, fólio 188v.
168. Codex Madri, fólio 59r.
169. Codex Arundel, fólio 83v.
170. Ms. I, fólio 41v.
171. Codex Leicester, fólio 8r.
172. Ver p. 225.

173.Codex Arundel, fólio 82v.
174.Ms. A, fólio 19r.
175.Ver Capra (2007), pp. 220-21. (ed. br., 2008, pp. 229-
176.31.) Ms. A, fólio 19r.
177.Ver Ms. I, fólio 115r.

CAPÍTULO 6: O CORPO EM MOVIMENTO

1. Ver Clark (1993), p. 38.
2. Ver Capra (2007), pp. 226 e 244ss. (ed. br., 2008, pp.
3. 235 e 252ss.) Codex Arundel, fólios 151r, v.
4. Ver Capra (2007), pp. 243ss. (ed. br., 2008, pp.
5. 250ss.) Ver Laurenza (2003), p. 37.
6. Ver Keele (1983), p. 103.
7. Estudos Anatômicos, fólio 147v.
8. *Trattato*, capítulo 304.
9. Ver Keele (1983), pp. 163ss.
10. Ver capítulo 8, pp. 297ss.
11. *Trattato*, capítulo 317.
12. *Ibid.*, capítulo 398.
13. Ver Keele (1983), pp. 173ss.
14. *Trattato*, capítulo 68; IR 176.
15. Ms. Ashburnham II, 20r; SB 149.
16. *Trattato*, capítulo 367.
17. Ver Capra (2007), pp. 93ss. (ed. br., 2008, pp. 111ss.)
18. A maioria dos desenhos anatômicos de Leonardo (mais de duzentos fólios, quase sempre preenchidos de ambos os lados) se encontra na Coleção Windsor; ver Bibliografia na p. 397 para sua edição crítica fac-similada.
19. Estudos Anatômicos, fólio 154r.
20. Ver Laurenza (2009).

21. *Ibid.*, pp. 17ss.
22. Ver Capra (2007), pp. 70ss. (ed. br., 2008, pp. 90ss.)
23. Ver Keele (1983), p. 8.
24. Ver Laurenza (2009), pp. 22-3.
25. Ver Capra (2007), p. 33. (ed. br., 2008, p. 56) Ver
26. Laurenza (2009), p. 33.
27. Ver Capra (2007), pp. 81ss. (ed. br., 2008, pp. 101ss.)
28. Ver Laurenza (2009), p. 136.
29. Ver Capra (2007), pp. 153ss. (ed. br., 2008, pp.
30. 167ss.) Ver p. 169.
31. Ver Laurenza (2009), p. 60.
32. Estudos Anatômicos, fólio 139v.
33. Ver Laurenza (2009), p. 79; tradução minha.
34. Ver Capra (2007), pp. 141ss. (ed. br., 2008, pp.
35. 156ss.) Estudos Anatômicos, fólio 139v.
36. Ver Laurenza (2009), p. 133.
37. Ver pp. 249-50.
38. Estudos Anatômicos, RL 19061r; K/P 154r.
39. Ver pp. 155-56.
40. Estudos Anatômicos, fólio 154r.
41. *Ibid.*, fólio 113r.
42. Codex Arundel, fólio 115r.
43. Estudos Anatômicos, fólio 69v.
44. Codex Arundel, 115r., ver p. 354.
45. Estudos Anatômicos, fólio 69v.
46. Ver Laurenza (2009), pp. 45 e 48; tradução minha.
47. Ver Laurenza (2009); Keele (1983); O'Malley e Saunders (1982).
48. Ver Keele (1983), p. 251.
49. *Ibid.*, p. 256.
50. *Ibid.*, pp. 156ss.
51. Estudos Anatômicos, fólio 143v.
52. *Ibid.*, fólio 154r.

53. Ver Keele (1983), p. 266.
54. Estudos Anatômicos, fólio 113r.
55. *Ibid.*, fólio 154r.
56. Ver Keele (1983), p. 267.
57. Estudos Anatômicos, fólio 177r.
58. *Ibid.*, fólio 175v.
59. As estruturas que Leonardo chama de “membranas” são conhecidas hoje como “bolsas”. São sacos cheios de fluido, revestidos de “membranas sinoviais”, que funcionam como almofadas entre os ossos e os tendões em volta de uma articulação.
60. Estudos Anatômicos, fólio 179v.
61. Ver Nuland (2000), p. 137.
62. Estudos Anatômicos, fólio 154r.
63. Ver Keele (1983), p. 275.
64. Estudos Anatômicos, fólio 151r.
65. Estudos Anatômicos, fólio 143r.
66. *Ibid.*, fólio 152r.
67. Ver O’Malley e Saunders (1982), pp. 186ss.
68. Estudos Anatômicos, fólio 140v.
69. Ver O’Malley e Saunders (1982), pp. 132ss.
70. *Ibid.*, p. 140, para uma análise pormenorizada desses desenhos.
71. Estudos Anatômicos, fólio 135v.
72. O nome técnico completo desse músculo é *pronator teres*. O outro músculo pronador, conhecido como *pronator quadratus*, aparece no terceiro desenho como uma estrutura quadrada que une os dois ossos do antebraço perto do pulso; ver Keele (1983), p. 270.
73. Ver O’Malley e Saunders (1982), p. 188.
74. *Ibid*.
75. Codex Arundel, fólios 151r, v; ver também p. 194.
76. Ver Capra (2007), pp. 243ss. (ed. br., 2008, pp.
77. 248ss.) Ibid., pp. 249ss. (ed. br., 2008, pp. 256ss.)

78. Estudos Anatômicos, fólio 39r.
79. *Ibid.*, fólio 76v.
80. *Ibid*.
81. Ver O'Malley e Saunders (1982), p. 378, para identificações dos traços anatômicos detalhados desse estudo.
82. Ver Keele (1983), p. 249.

CAPÍTULO 7: A CIÊNCIA DO VOO

1. Ver p. 260.
2. Ver Capra (2007), p. 21. (ed. br., 2008, p. 44.) Ver Laurenza (2009), p. 78.
3. Estudos Anatômicos, fólio 89r.
4. Ver Capra (2007), p. 50 (ed. br., 2008, p. 71.)
5. Ver O'Malley e Saunders (1982), pp. 204ss.
6. Ms. G, folio 5v.
7. Ver Capra (2007), p. 34 (ed. br., 2008, p. 56.)
8. Ver Richards (2002), pp. 8ss.
9. *Ibid.*, p. 533.
10. Ver p. 85.
11. Ver p. 218.
12. Ver Capra (1996), pp. 48-9.
13. Codex Arundel, fólio 156v.
14. Codex Atlanticus, fólio 156v.
15. Ver Laurenza (2004), pp. 17-8
16. Ver Arasse (1998), pp. 294-95. As asas realistas pintadas pelo jovem Leonardo foram aumentadas por mão posterior numa alteração infe - liz, aparentemente para parecerem mais canônicas; ver Bramly (1991), p. 143.

18. Para um relato detalhado dos estudos de Leonardo sobre o voo, ver Laurenza (2004).
19. 20. Ver Capra (2007), pp. 90ss. (ed. br., 2008, pp. 109ss.) Ver pp. 291ss.
21. Ver Giacomelli (1930).
22. Codex Atlanticus, fólio 434r.
23. Ver p. 232.
24. Codex Trivulzianus, fólio 6v.
25. A primeira explicação de Leonardo só é correta em parte, pois não leva em conta a sustentação gerada pela baixa pressão do ar em cima das asas, que é o efeito mais forte; ver p. 281.
26. Ver pp. 204-05.
27. Codex Atlanticus, fólio 1058v.
28. Ver Laurenza (2004), p. 38.
29. *Ibid.*, p. 44.
30. Ms. B, fólio 83v.
31. Ver Reti (1964).
32. Para uma análise detalhada da dinâmica dessa máquina, ver Laurenza, Taddei e Zanon (2005), pp. 55ss.
33. Ms. B, fólio 74v.
34. Ver Kemp e Roberts (1989), pp. 236ss.
35. Ver Capra (2007), pp. 105ss. (ed. br., 2008, pp.
36. 123ss.) O Ms. K na verdade consiste de três partes escritas em diferentes épocas, a primeira das quais, conhecida como K^1, é a que traz notas sobre o voo dos pássaros.
37. Codex *Sul Volo*, fólio 10v.
38. Ver Capra (2007), pp. 260ss. (ed. br., 2008, pp.
39. 266ss.) Ver pp. 47-8.
40. Ver Moin e Kim (1997).
41. Ver, por exemplo, Alexander (2002).
42. Ver p. 294.

43. O teorema de Bernoulli é mera consequência da conservação da energia. Foi intuído e formulado corretamente por Leonardo 250 anos antes de Bernoulli para o caso específico dos jatos de água que escapam de um tanque a diferentes alturas; ver pp. 195ss.
44. Ver Alexander (2002), pp. 36ss.
45. *Ibid.*, pp. 72ss.
46. Ms. E, fólio 54r.
47. Ver pp. 62ss.
48. Codex Atlanticus, fólio 77r.
49. *Ibid.*, fólio 493r.
50. Ms. E, fólio 45v.
51. Ver p. 196.
52. Ver p. 294.
53. Ver p. 223.
54. Ms. G, fólio 50v.
55. Ver Codex Arundel, 96v.
56. Ver p. 209.
57. Ms. K, fólio 3r.
58. Ver Marinoni (1982).
59. Ver, por exemplo, Burton (1990), p. 28.
60. Ver pp. 281-82.
61. Codex *Sul Volo*, fólio 18r.
62. Ms. F, fólio 40v.
63. Codex *Sul Volo*, fólio 14v.
64. Ms. K, fólio 9r.
65. Ver Anderson (1997), p. 25.
66. Ver pp. 292ss.
67. Codex Atlanticus, 45r.
68. *Ibid.*, fólios 825r, 843r, 1030r.
69. Codex *Sul Volo*, fólio 16r.
70. *Ibid*.

71. Codex Atlanticus, fólio 434r.
72. Ver p. 180 para minha discussão sobre o conceito de alma em Leonardo.
73. Codex *Sul Volo*, interior da última capa.
74. *Ibid.*, fólio 18v.
75. *Ibid.*, fólio 9r.
76. *Ibid.*, fólios 8v, 8r, 7v.
77. Ms. G, fólio 64r.
78. Codex *Sul Volo*, 6v.
79. Ver Capra (2007), pp. 119ss. (ed. br., 2008, pp.
80. 135ss.) *Ibid.*, p. IX. (ed. br., 2008, p. 7).
81. Ms. E, fólio 54r.
82. Ver pp. 46-47.
83. Ver pp. 77ss.
84. Ms. E, fólios 43r e 47v. A observação de Leonardo, de que os pássaros não podem voar acima de determinada altitude por causa da rarefação do ar, é correta em princípio. Na prática, porém, a diminuição do oxigênio em locais muito altos é um fator mais decisivo.
85. Ms. E, fólio 38r; ver também Codex Atlanticus, fólio 1058v, citado na p. 239.
86. Ver pp. 283ss.
87. Ver Anderson (1997), p. 20.
88. Ver p. 294.
89. Martin Kemp, em Kemp e Roberts (1989), p. 239.

CAPÍTULO 8: O MISTÉRIO DA VIDA

1. Ver pp. 31-2.
2. Ms. C, fólio 26v.
3. Ver p. 36.

4. Codex Leicester, fólio 34r; ver também p. 68.
5. Ms. H, fólio 89v; Codex Atlanticus, fólio 207v.
6. Ver Capra (1996), p. 34.
7. Ms. G, fólio 32v; ver também p. 140.
8. *Ibid.*, fólio 35v; ver também p. 141.
9. Codex Atlanticus, 728r.
10. Ver, por exemplo, Grmek (1998).
11. Ver pp. 167-68.
12. Ver pp. 32ss.
13. Ver pp. 41-2.
14. Ver pp. 42-3.
15. Ver Keele (1983), pp. 304-05.
16. *Ibid.* (1952), pp. 53ss.
17. Ver, por exemplo, Windelband (2001), pp. 186-87.
18. Para uma análise detalhada dos traços anatômicos desses desenhos, ver O'Malley e Saunders (2003), pp. 216 e 218.
19. Ms. G, fólio 1v.
20. Estudos Anatômicos, fólio 59v.
21. O *vagus* (também usado no plural, *vagi*) tem um curso e distribuição mais extensos que qualquer outro nervo craniano: atravessa o pescoço, o tórax e o abdome, suprindo o coração e vários outros órgãos com fibras sensoriais e motoras.
22. Estudos Anatômicos, fólio 105r.
23. Ms. G, fólio 1v.
24. Estudos Anatômicos, fólio 155r.
25. *Ibid.*, fólio 174v.
26. Ver Keele (1983), pp. 310ss.
27. Estudos Anatômicos, fólio 165v.
28. Ver Schott (1980).
29. Estudos Anatômicos, fólio 50r.

30. *Ibid.*, fólio 115r. O impulso cardíaco resulta do fato de o coração girar, mover-se para a frente e golpear a parede do peito durante a sístole, tal como afirmou Leonardo.
31. Ver p. 252.
32. Ver Keele (1965), p. 127.
33. *Ibid.* (1952), p. 128; Harvey, aparentemente, realizou o mesmo experimento em cães vivos um século mais tarde; ver *ibid*.
34. Para uma discussão detalhada dos estudos de Leonardo da fisiologia da respiração (o papel dos ossos e articulações da coluna vertebral e das costelas na mecânica da respiração, as forças musculares que dilatam os pulmões e a anatomia da traqueia e do pulmão), ver Keele (1983), pp. 289ss.
35. Estudos Anatômicos, fólio 155r.
36. Ver pp. 48-49.
37. Ver p. 214.
38. Ver Keele (1965), p. 122.
39. Estudos Anatômicos, fólio 156v.
40. Ver Keele (1965), p. 146.
41. Ver p. 323.
42. Ver Capra (2007), p. 254. (ed. br., 2008, pp. 260-61)
43. *Ibid.*, pp. 244ss. (ed. br., 2008, pp. 251ss.) Ver p. 323.
44. Ver p. 323.
45. Estudos Anatômicos, fólio 164r.
46. *Ibid.*, fólio 156v.
47. *Ibid.*, fólio 115r.
48. *Ibid.*, fólios 115r, 115v, 171r, 172v.
49. Estudos Anatômicos,, fólio 172v.
50. *Ibid*.
51. Para uma descrição das técnicas de visualização de fluxo de Leonardo, ver pp. 48-49.
52.

53. Estudos Anatômicos, 171r; para os primeiros usos dessa técnica por Leonardo, ver Capra (2007), p. 163.
54. (ed. br., 2008, p. 178.) Ver Gharib *et al*. (2002).
55. Ver Nuland (2000), pp. 146ss.
56. Ver O'Malley e Saunders (2003), p. 28.
57. Ver Keele (1952), p. 73.
58. Ver pp. 156-57.
59. Ver p. 260.
60. Para uma análise detalhada dos traços anatômicos desses desenhos, ver O'Malley e Saunders (2003), p. 304.
61. Na moderna terminologia, só o ramo que penetra no fígado é chamado de artéria hepática; ver O'Malley e Saunders (2003), p. 304, para os nomes dos outros ramos.
62. *Ibid*.
63. Ver p. 260.
64. Estudos Anatômicos, fólio 69r.
65. *Ibid*., fólio 69v.
66. Ver O'Malley e Saunders (2003), p. 300.
67. Ver Leibowitz (1970), pp. 7-8.
68. Ver Keele (1983), pp. 327ss, para uma análise detalhada dos estudos de Leonardo do sistema digestório.
69. Estudos Anatômicos, 158v. Leonardo não está completamente errado nessa explicação. Dividindo as cavidades do peito e do abdome, o diafragma não só é o principal músculo usado na respiração como estimula o estômago e o fígado em seu movimento descendente, facilitando assim os processos digestivos.
70. Estudos Anatômicos, fólio 39v.
71. *Ibid*., fólio 50r.
72. *Ibid*.

73. Ver p. 321.
74. Estudos Anatômicos, fólio 50r.
75. Citado em Capra (1996), p. 48.
76. Ver *ibid.*, pp. 86ss.
77. Ver Keele (1952), p. 122.
78. Ver Laurenza (2009), pp. 164-65.
79. Estudos Anatômicos, fólio 198v.
80. Ver O'Malley e Saunders (2003), pp. 482ss.
81. Ver Keele (1983), p. 357.
82. Ver p. 149. O equivalente do cordão umbilical nas plantas foi redescoberto por Nathaniel Highmore duzentos anos após a observação de Leonardo; ver Needham (1934), p. 107.
83. Estudos Anatômicos, fólio 196v.
84. Ver Keele (1983), p. 362.
85. Ver Nuland (2000), p. 161.
86. Estudos Anatômicos, fólio 197r.
87. Ver Needham (1934), p. 80.
88. Estudos Anatômicos, fólio 198c.
89. *Ibid.*, fólio 197r.
90. Ver Needham (1934), p. 81.
91. Estudos Anatômicos, fólio 198c.
92. *Ibid.*, fólio 114v.
93. Ver Laurenza (2009), pp. 160ss.
94. Ver Capra (2007), pp. 249ss. (ed. br., 2008, pp.
95. 256ss.) Ver Capra (2007), pp. 124ss. (ed. br., 2008,
96. pp. 140ss.) Esses detalhes são mais claros nos estudos de Leonardo do que nas cópias existentes da pintura; ver p. 117.
97. Ver Arasse (1998), p. 394.
98. Ver Kemp (1981), p. 265.
99. Ver Keele (1959).
100. Ver Keele (1983), p. 35.

101.Ms. I, fólio 18r.
102.Ver Clark (1993), p. 250.

Os Cadernos de Notas de Leonardo: Fac-símiles e Transcrições

As citações dos manuscritos de Leonardo referem-se às edições críticas listadas na Bibliografia. Retraduzi algumas das passagens para que ficassem mais próximas do texto original, de modo a preservar seu sabor leonardesco.

ESTUDOS ANATÔMICOS (COLEÇÃO WINDSOR)

Kenneth Keele e Carlo Pedretti, *Leonardo da Vinci, Corpus of the Anatomical Studies in the Collection of Her Majesty the Queen at Windsor Castle*, 3 vols., Harcourt Brace Jovanovich, Nova York, 1978-1980.

DESENHOS E PAPÉIS DIVERSOS (COLEÇÃO WINDSOR)

Carlo Pedretti, *The Drawings and Miscellaneous Papers of Leonardo da Vinci in the Collection of Her Majesty the Queen at Windsor Castle; Volume I: Landscapes, Plants and Water Studies;* Harcourt Brace Jovanovich, Nova York, 1982; *Volume II: Horses and Other Animals*, Harcourt Brace Jovanovich, Nova York, 1987.

(Figure Studies, Profiles, and Caricatures) e IV (*Miscellaneous Papers*) ainda não publicados em fac-símile; os fólios deles constantes são identificados nas notas de rodapé deste livro por seus números de catálogo da Royal Library (RL).

CODEX ARUNDEL

Leonardo da Vinci, *Il Codice Arundel 263 nella British Library: edizione in facsimile nel riordinamento cronologico dei suoi fascicoli; a cura di Carlo Pedretti; trascrizioni e note critiche a cura di Carlo Vecce*, Giunti, Florença, 1998.

CODEX ATLANTICUS

Leonardo da Vinci, *Il codice atlantico della Biblioteca ambrosiana di Milano, trascrizione diplomatica e critica di Augusto Marinoni*, Giunti, Florença, 1975-1980.

CODEX SUL VOLO [CODEX SOBRE O VOO DOS PÁSSAROS]

Leonardo da Vinci, *The codex on the flight of birds in the Royal Library at Turin*, organizado por Augusto Marinoni, Johnson Reprint, Nova York, 1982.

CODEXS FORSTER I, II, III

Leonardo da Vinci, *I Codici Forster del Victoria and Albert Museum di Londra; trascrizione diplomatica e critica di Augusto Marinoni, edizione in facsimile*, 3v., Giunti, Florença, 1992.

CODEX LEICESTER (ANTERIORMENTE "CODEX HAMMER")

Leonardo da Vinci, *The Codex Hammer*, traduzido para o inglês e anotado por Carlo Pedretti, Giunti, Florença, 1987.

CÓDICES MADRI I, II

Leonardo da Vinci, *The Madrid Codices*, transcrito e traduzido por Ladislao Reti, McGraw-Hill, Nova York, 1974.

MANUSCRITOS DO INSTITUT DE FRANCE

Leonardo da Vinci, *I manoscritti dell'Institut de France, edizione in facsimile sotto gli auspici della Commissione nazionale vinciana e dell'Institut de France, trascrizione*

diplomatica e critica di Augusto Marinoni, Giunti, Florença, 1986-1990.

(Mss. A, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L, M; ms. A inclui como suplemento o *Ashburnham II*, também listado como B.N. 2038; ms. B inclui como suplemento o *Ashburnham I*, também listado como B.N. 2037.)

CODEX TRIVULZIANUS

Leonardo da Vinci, *Il codice di Leonardo da Vinci nella Biblioteca trivulziana di Milano, trascrizione diplomatica e critica di Anna Maria Brizio*, Giunti, Florença, 1980.

TRATTATO DELLA PITTURA (CODEX URBINAS)

Leonardo da Vinci, *Libro di pittura, Codice urbinate lat. 1270 nella Biblioteca apostolica vaticana, a cura di Carlo Pedretti, trascrizione critica di Carlo Vecce*, Giunti, Florença, 1995.

FÓLIO VENEZIANO (O HOMEM VITRUVIANO)

Leonardo da Vinci, *I Disegni di Leonardo da Vinci e della Sua Cerchia, Vol. IV: Venezia, Galleria dell'Accademia, Catalogo a Cura di Giovanna Nepi Sciré e Annalisa Perissa Torrini*, Giunti, Florença, 2003.

Bibliografia

Ackerman, James, “Science and Art in the Work of Leonardo”, *in* C. D. O’Malley (org.), *Leonardo’s Legacy, An International Symposium*, University of California Press, Berkeley & Los Angeles, 1969.

Alexander, David, *Nature’s Flyers*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2002.

Ames-Lewis, Francis, “Leonardo’s Botanical Drawings”, *in* Claire Farago (org.), *Leonardo’s Science and Technology*, Garland Publishing, Nova York, 1999.

Anderson, John, *A History of Aerodynamics*, Cambridge University Press (1997).

Arasse, Daniel, *Leonardo da Vinci: The Rhytm of the World*, Konecky & Konecky, Nova York, 1998.

Bedini, Silvio e Ladislao Reti, “Horology”, *in* Ladislao Reti (org.), *The Unknown Leonardo*, McGraw-Hill, Nova York, 1974.

Bertoloni-Meli, Domenico, *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Johns Hopkins University Press, 2006.

Bottazzi, Filippo, “Leonardo as Physiologist”, *in Leonardo da Vinci*, Reynal, Nova York, 1956.

Bramly, Serge, *Leonardo*, Harper Collins, Nova York, 1991.

Brown, David Alan, “Verrocchio and Leonardo: Studies for the *Giostra*”, *in* Elizabeth Cropper (org.), *Florentine Drawing at the Time of Lorenzo the Magnificent*, Nuova Alfa Editoriale, Bologna, 1994.

Burton, Robert, *Bird Flight*, Facts on File, Nova York, 1990.

Capra, Fritjof, *The Turning Point*, Simon & Schuster, Nova York, 1982. [*O Ponto de Mutação*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 1986.]

_____, *The Web of Life*, Doubleday, Nova York, 1996. [*A Teia da Vida*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 1997.]

_____, *The Hidden Connections*, Doubleday, Nova York, 2002. [*As Conexões Ocultas*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 2002.]

_____, *The Science of Leonardo*, Doubleday, Nova York, 2007. [*A Ciência de Leonardo da Vinci*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 2008.]

_____, *La Botanica di Leonardo: Un Discorso sulla Scienza delle Qualità*, Aboca Edizioni, 2008. [*A Botânica de Leonardo da Vinci - Um Ensaio sobre a Ciência das Qualidades*, publicado pela Editora Cultrix, São Paulo, 2011.]

Clagett, Marshall, “Leonardo da Vinci: Mechanics”, *in* Claire Farago (org.), *Leonardo’s Science and Technology*, Garland, Nova York, 1999.

Clark, Kenneth, *Leonardo da Vinci*, Penguin, 1993.

Davidson, P. A., *Turbulence*, Oxford University Press, 2004.

Dibner, Bern, “Leonardo: Prophet of Automation”, *in* C. D. O’Malley (org.), *Leonardo’s Legacy: An International Symposium*, University of California Press, Berkeley & Los Angeles, 1969.

_____, “Machines and Weaponry”, *in* Ladislao Reti (org.), *The Unknown Leonardo*, McGraw-Hill, Nova York, 1974.

Ellenberger, François, *History of Geology*, 2 vols., Oxford & IBH, Nova Délhi, 1996.

Eloy, Christophe, “Leonardo’s Rule, Self-Similarity, and Wind-Induced Stresses in Trees”, *Physical Review Letters*, 107, 258101, 16 de dezembro de 2011.

Emboden, William, *Leonardo da Vinci on Plants and Gardens*, Dioscorides Press, Portland, Óregon, 1987.

Fasso, Constantino, “Birth of Hydraulics during the Renaissance Period”, *in* Günther Garbrecht (org.), *Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review*, Balkema, Boston, 1987.

Galluzzi, Paolo (org.), *Renaissance Engineers*, Giunti, Florença, 1996.

Galluzzi, Paolo (org.), *Léonard de Vinci: Ingénieur et Architecte*, Musée des Beaux-Arts de Montréal, 1987.

Gharib, M., D. Kremers, M. M. Koochesfahni, M. Kemp, “Leonardo’s Vision of Flow Visualization”, *Experiments in Fluids*, 33, pp. 219-23, 2002.

Giacomelli, Raffaele, “The Aerodynamics of Leonardo da Vinci”, Journal of the Royal Aeronautical Society, XXXIV, pp. 1016-038, 1930.

Giacomelli, Raffaele, “La Scienza dei Venti di Leonardo da Vinci”, *in Atti del Convegno di Studi Vinciani*, Olschki, Florença, 1953; pp. 374-98.

Gohau, Gabriel, *A History of Geology*, Rutgers University Press, 1991.

Gould, Stephen Jay, "The Upwardly Mobile Fossils of Leonardo's Living Earth", *in Leonardo's Mountain of Clams and the Diet of Worms*, Harmony Books, Nova York, 1998.

Grmek, Mirko (org.), *Western Medical Thought from Antiquity to the Middle Ages*, Harvard University Press, 1998.

Keele, Kenneth, *Leonardo da Vinci on Movement of the Heart and Blood*, Lippincott, Filadélfia, 1952.

_____, "The Genesis of Mona Lisa", *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, vol. 14, pp. 135-59, 1959.

_____, *William Harvey*, Nelson, Londres, 1965.

_____, *Leonardo da Vinci's Elements of the Science of Man*, Academic Press, Nova York, 1983.

Kemp, Martin, *Leonardo da Vinci: The Marvellous Works of Nature and Man*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1981.

_____, "The Crisis of Received Wisdom in Leonardo's Late Thought", *in* E. Bellone e P. Rossi (orgs.), *Leonardo e l'Età della Ragione*, Scientia, Milão, 1982.

_____, "Body of Earth and Body of Man", *in Leonardo da Vinci: Artist, Scientist, Inventor*, Catalogue of Exhibition at Hayward Gallery, Yale University Press, 1989.

_____, "Analogy and Observation in the Codex Hammer", *in* Claire Farago (org.), *Leonardo's Science and Technology*, Garland Publishing, Nova York, 1999.

Kemp, Martin e Jane Roberts (orgs.), *Leonardo da Vinci: Artist, Scientist, Inventor*, Catalogue of Exhibition at

Hayward Gallery, Yale University Press, 1989.

Kline, Morris, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, Oxford University Press, Nova York, 1972.

Laurenza, Domenico, *La Ricerca dell'Armonia: Rappresentazioni Anatomiche del Rinascimento*, Olschki, Florença, 2003.

_____, *Leonardo on Flight*, Giunti, Florença, 2004.

_____, "La Grammatica delle Forme", *in* Paolo Galluzzi (org.), *La Mente di Leonardo*, Exhibition Catalogue, Uffizi Gallery, março de 2006 a janeiro de 2007, Giunti, Florença, 2006a.

Laurenza, Domenico, "L'Uomo Geometrico", *in* Paolo Galluzzi (org.), *La Mente di Leonardo*, Exhibition Catalogue, Uffizi Gallery, março de 2006 a janeiro de 2007, Giunti, Florença, 2006b.

_____, "Moti di 'Consumazione'", *in* Paolo Galluzzi (org.), *La Mente di Leonardo*, Exhibition Catalogue, Uffizi Gallery, março de 2006 a janeiro de 2007, Giunti, Florença, 2006c.

_____, "Le forme come matrici universali", *in* Paolo Galluzzi (org.), *La Mente di Leonardo*, Exhibition Catalogue, Uffizi Gallery, março de 2006 a janeiro de 2007, Giunti, Florença, 2006d.

_____, *Leonardo: L'Anatomia*, Giunti, Florença, 2009.

Laurenza, Domenico, Mario Taddei e Edoardo Zanon, *Le Macchine di Leonardo*, Giunti, Florença, 2005.

Leibowitz, Joshua, *The History of Coronary Heart Disease*, University of California Press, Berkeley & Los Angeles, 1970.

Livio, Mario, *The Golden Ratio*, Broadway Books, Nova York, 2002.

Lovelock, James, *Healing Gaia*, Harmony Books, Nova York, 1991.

Macagno, Enzo, “Mechanics of Fluids in the Madrid Codices”, *Scientia*, pp. 333-74, Milão, 1982.

_____, *Leonardian Fluid Mechanics in the Codex Atlanticus*, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 1986.

_____. “Leonardo da Vinci: Engineer and Scientist”, *in* Günther Garbrecht (org.), *Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review*, Balkema, Boston, 1987.

Maccagni, Carlo, “The Italian school of hydraulics in the 16th and 17th centuries”, *in* Günther Garbrecht (org.), *Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review*, Balkema, Boston, 1987.

Marinoni, Augusto, “Introduction to Leonardo da Vinci”, *The Codex on the Flight of Birds in the Royal Library at Turin*, Johnson Reprint, Nova York, 1982.

Merzkirch, Wolfgang, *Flow Visualization*, 2ª ed., Academic Press, Nova York, 1987.

Moin, Parviz e John Kim, “Tackling Turbulence with Supercomputers”, *Scientific American*, janeiro de 1997.

Moody, Ernest e Marshall Clagett (orgs.), *The Medieval Science of Weights*, University of Wisconsin Press, Madison, 1952.

Needham, Joseph, *A History of Embryology*, Cambridge University Press, Londres, 1934.

Nuland, Sherwin B., *Leonardo da Vinci*, Viking Penguin, Nova York, 2000.

O'Malley, C. D. e J. B. Saunders, *Leonardo da Vinci on the Human Body*, Crown, Nova York, 1982; ed. 2003 por Gramercy Books, Nova York.

Pedretti, Carlo, *Leonardo: The Machines*, Giunti, Florença, 1999.

Pizzorusso, Ann, "Leonardo's Geology", *Leonardo*, vol. 29, nº 3, 1996.

Reti, Ladislao, "Helicopters and Whirligigs", Raccolta Vinciana, vol. XX, pp. 331-38, 1964.

_____, "Leonardo on Bearings and Gears", Scientific American, vol. 224, nº 2, pp. 100-10, fevereiro de 1971.

_____, "Elements of Machines", em Ladislao Reti (org.), *The Unknown Leonardo*, McGraw-Hill, Nova York, 1974, pp. 264-87.

Richards, Robert, *The Romantic Conception of Life*, University of Chicago Press, 2002.

Richter, J.-P., *The Notebooks of Leonardo da Vinci Compiled and Edited from the Original Manuscripts*, 2 vols., publicado originalmente em 1883; reimpresso por Dover Publications, Nova York, 1970.

Roberts, Jane, "The Drawings and Manuscripts", *in Leonardo da Vinci: Artist, Scientist, Inventor*, Catalogue of Exhibition at Hayward Gallery, Yale University Press, 1989.

Sabersky, Rolf H. *et al.*, *Fluid Flow: A First Course in Fluid Mechanics*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.

Saunders, J. B. e Charles D. O'Malley, *The Illustrations from the Works of Andreas Vesalius*, World Publishing, Cleveland, 1950; edição em brochura da Dover, Nova York, 1973.

Schott, A., “Historical Notes on the Mechanism of Closure of the Atrioventricular Valves”, *Medical History*, vol. 24, pp. 163-84, 1980.

Wicander, Reed e James Monroe, *Essentials of Geology*, West Publishing, Nova York, 1995.

Windelband, Wilhelm, *A History of Philosophy*, publicado originalmente em 1901 por Macmillan; reimpresso por The Paper Tiger, Cresskill, NJ, 2001.

Zammattio, Carlo, “The Mechanics of Water and Stone”, *in* Ladislao Reti (org.), *The Unknown Leonardo*, McGraw-Hill, Nova York, 1974.

Zöllner, Frank e Johannes Nathan, *Leonardo da Vinci: The Complete Paintings and Drawings*, Taschen, 2003.

Créditos das fotos

Alinari/Art Resource (Fig. 7-2);

Archivio Fotografico IMSS, Florença, fotografia da Eurofoto (Fig. 5-10b); Archivio Fotografico IMSS, Florença, fotografia de Simon Hazelgrove (Fig. 7-7); Biblioteca Apostolica Vaticana (Fig. 6-6);

Biblioteca Nacional de España, Madri (Figs. 5-3, 5-4, 5-7, 5-8, 5-10a, 5-13, 5-14, 5-16); Biblioteca Nazionale Centrale, Florença, cortesia do Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Fig. 6-5); Biblioteca Reale, Turim, cortesia do Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Figs. 7-8, 7-13, 7-15, 7-16); Boiymans van Beuningen Museum, Roterdã (Fig. 3-2);

Cameraphoto Arte, Veneza/Art Resource (Gravura 4); http://hyperphysics.phy-astr.gsv.edu/hbase/hframe.html (Fig. 5-5); Polo Museale Fiorentino (Gravura 1; Fig. 3-1);

Réunion des Musées Nationaux/Art Resource (Gravuras 3, 5, 12; Figs. 1-3, 1-4, 1-6, 3-9, 5-11, 5-17, 5-18, 5-19, 5-20, 6-1a, 6-1b, 7-3, 7-4, 7-5, 7-6, 7-12); Scala/Ministero per i Beni

e le Attività Culturali/Art Resource (Gravura 11); Seth Joel/CORBIS (Figs. 1-1, 1-7, 1-8, 2-7, 2-8, 5-6);

The Royal Collection © 2011, Her Majesty Queen Elizabeth II (Gravuras 2, 6, 7, 8, 9, 10; Figs. 1-5, 1-9, 1-10, 1-11, 1-13, 1-14, 1-15, 1-16, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 3-3, 3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6, 4-7, 6-2, 6-3, 6-4, 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11, 6-12, 6-13, 7-1, 7-14, 8-2, 8-4, 8-5, 8-6, 8-9); Veneranda Biblioteca Ambrosiana – Milão/De Agostini Picture Library (Figs. 1-2, 1-12, 5-1, 8-7, 8-8); World Publishing, Cleveland, Ohio (Figs. 4-8, 4-9, 4-10).

Próximos lançamentos

Para receber informações sobre os
lançamentos da Editora Cultrix, basta cadastrar-se
no site: www.editoracultrix.com.br

Para enviar seus comentários sobre este livro,
visite o site www.editoracultrix.com.br
ou mande um e-mail para
atendimento@editoracultrix.com.br